

Innovative Technologien für Ressourceneffizienz

Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe (r⁴)

Ergebnisse



2015

2016

2017

2018

2019

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



FONA
Ressourceneffizienz
BMBF



**Innovative Technologien
für Ressourceneffizienz**
Forschung zur Bereitstellung
wirtschaftsstrategischer Rohstoffe

Innovative Technologien für Ressourceneffizienz

Forschung zur Bereitstellung
wirtschaftsstrategischer Rohstoffe (r⁴)

ERGEBNISSE

Inhaltsverzeichnis

Die BMBF-Fördermaßnahme	
Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe (r ⁴)	6
r ⁴ -Verbundprojekte – Suche und Erkundung von Primärrohstoffen	11
DESMEX – Elektromagnetische Tiefensondierung für die Lagerstättenerkundung	12
GEM – Granitgebundene Erze strategischer Metalle - Bildungsbedingungen und Ableitung innovativer Suchkriterien für verborgene Erzkörper	14
HiTEM – Hochsensitives Messinstrument für die Transiente Elektromagnetik zur Exploration von tiefliegenden Mineralienvorkommen	16
HTMET – Hochttechnologie-relevante Metalle in deutschen sulfidischen Buntmetallerzen - Ressourcenpotenzialabschätzung	18
MinNoBeck – Ressourcenpotenzial verdeckter hydrothermalen Mineralisationen im Norddeutschen Becken	20
REEMAP – Hyperspektralanalyse Seltener Erden	22
ResErVar – Ressourcenpotenzial hydrothermalen Lagerstätten der Varisziden	24
WISTAMERZ – Prognose wirtschaftsstrategischer Hochttechnologiemetalle am Beispiel des Erzgebirges	26
r ⁴ -Verbundprojekte – Gewinnung und Aufbereitung von Primärrohstoffen	29
AFK – Aufbereitung feinkörniger heimischer polymetallischer In/W/Sn-Komplexerzlagertstätten	30
ELIZE – Elektroimpulszerkleinerung in großtechnischen Zerkleinerungsmaschinen zur Aufbereitung komplexer Erze	32
OptiWiM – Optimierung der Wertschöpfungskette für polymineralische Erze wirtschaftsstrategischer Metalle	34
SEESand – Gewinnung schwerer Seltenerdelemente aus Schwermineralsanden	36
SE-FLECX – Selektive Flüssig-Flüssig-Extraktion von Lanthanoiden und Actinoiden durch präorganisierte Calixarene	38
SEM ² – Seltene-Erden-Metallurgie - Fortgeschrittene Methoden für die optimierte Gewinnung und Aufbereitung am Beispiel von Ionenadsorptionstonen	40
UPNS4D+ – Untertägiges 4D+ Positionierungs-, Navigations- und Mapping-System zur hochselektiven, effizienten und im höchsten Maße sicheren Gewinnung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe	42
r ⁴ -Verbundprojekte – Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen	45
ARGOS – Steigerung des funktionellen Recyclings entlang der Wertschöpfungskette durch Echtzeitanalyse metallreicher Aufbereitungsprodukte	46
BiRec – Entwicklung einer nachhaltigen Prozessroute zur innereuropäischen Aufbereitung von Bismutschäumen durch Kombination innovativer Raffinationsverfahren	48
EcoGaIN – Gewinnung von Gallium aus Produktionsabfällen der Halbleiter-Industrie	50
ELEXSA – Elektrodynamische Fragmentierung von Schlacken und Aschen mit nachfolgender hydrothermaler Extraktion wirtschaftsstrategischer Rohstoffe aus den Schlacke/Asche-Feinfraktionen	52
GRAPHIT 2.0 – Technologieentwicklung zur Gewinnung von Sekundärgraphit aus rezyklierten Kohlenstofffasern	54

Lan-Tex – Rückgewinnung von Lanthan aus Rückständen der Raffineriekatalysatorherstellung für die Petrochemie mit Hilfe von Polyelektrolyt-ausgerüsteten Textilien	56
MetalSens – Entwicklung einer Prozesskette zur staubarmen Rückgewinnung von Technologiemetallen bestückter Leiterplatten mittels sensorgestützter Sortierung	58
MinSEM – Konzept zur Rückgewinnung von Seltenerdelementen sowie Platingruppenmetallen aus mineralischen Aufbereitungs- und Produktionsrückständen	60
REWITA – Recycling bergbaulicher Aufbereitungsrückstände zur Gewinnung wirtschaftsstrategischer Metalle am Beispiel der Tailings am Bollrich in Goslar	62
SESAM – Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus Flugaschen der Müllverbrennung	64
Theisenschlamm – Gewinnung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe aus Stäuben der Kupferherstellung	66
TransTech – Entwicklung transformativer Laugungstechnologien zur Steigerung der Ressourcenausbeute von Li, Co und Ag führenden Rohstoffen	68
VAFLOW – Einsatz eines Vanadiumelektrolyts auf Basis von Sekundärrohstoffen in Redox-Flow-Batteriespeichersystemen	70
r ⁴ -Verbundprojekte – Kreislaufführung von Altprodukten	73
AddResources – Rückgewinnung und Wiedereinsatz von Antimontrioxid und Titandioxid aus Kunststofffraktionen der Elektroaltgeräteverwertung	74
AgREE – Ag-Recycling von Elektrolyseelektroden	76
DIBRAS – Direkter Einsatz von selbstreduzierenden Briketts in den Aggregaten der Stahl- und Gießereiindustrie zur Verbesserung der Ressourcenbilanz	78
gagendta+ – Modulare Prozesskette zur dezentralen Rückgewinnung von ausgewählten Technologiemetallen	80
MExEM – Keramische Membranextraktionssysteme und adaptierte Elektrochemische Verfahren zur Gewinnung Metallischer Rohstoffe aus niedrigkonzentrierten Lösungen	82
NeW-Bat – Neue energieeffiziente Wiederverwertung von Batteriematerialien	84
SEMAREC – Entwicklung einer industriell umsetzbaren Recycling-Technologieketten für NdFeB-Magnete	86
r ⁴ -Verbundprojekte – Flankierende Maßnahmen	89
r ⁴ -INTRA – Integrations- und Transferprojekt	90
GERRI – Einrichtung eines deutschen virtuellen Forschungs-Instituts „German Resource Research Institute“	92
r ⁴ -Verbundprojekte – Flankierende Maßnahmen Nachwuchsforscher	95
BakSolEx – Bakterielle Metallophore für die Solventextraktion	96
GORmin – Governanceoptionen für die akzeptable Gewinnung wirtschaftsstrategischer Ressourcen aus primären und sekundären Lagerstätten in Deutschland	98
GRAMM – Quantifizierung lagerstättenbildender Prozesse an granitischen Intrusionen als Grundlage für Explorationsmodelle wirtschaftsstrategischer Spurenmetalle	100
Kontaktdaten der Verbundpartner	103
Impressum	120

Die BMBF-Fördermaßnahme

Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe (r⁴)

ROHSTOFFBASIS FÜR ZUKUNFTSTECHNOLOGIEN IN DEUTSCHLAND SICHERN

Hightech-Standorte wie Deutschland benötigen Hightech-Rohstoffe, doch diese sind oft nur begrenzt verfügbar. Die aktuelle Liste kritischer Rohstoffe der Europäischen Union belegt die schwierige Versorgungslage. Die Kritikalität betrifft Seltene Erden, Antimon, Kobalt, Vanadium und weitere Metalle aber auch nichtmetallische Rohstoffe, wie Fluorit oder Baryt. Darunter sind zahlreiche wirtschaftsstrategische Rohstoffe, die mit ihren besonderen physikalischen und chemischen Eigenschaften für das Gelingen der Energiewende, Elektromobilität und für Industrie 4.0 essentiell sind.

Vor diesem Hintergrund hat sich das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit dem Forschungsrahmenprogramm „FONA – Forschung für nachhaltige Entwicklung“ auch das Ziel gesetzt, durch innovative Forschungs- und Entwicklungsvorhaben dazu beizutragen, das heimische Rohstoffangebot zu erhöhen und die Importabhängigkeit zu verringern. Konkretisiert durch die Fördermaßnahme „Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe (r⁴)“ (2015-2019) arbeiten bundesweit vierzig ausgewählte Verbundprojekte an diesem Ziel.

Welch vielfältige Ergebnisse diese vierzig geförderten Verbundprojekte auf den Gebieten primärer beziehungsweise sekundärer wirtschaftsstrategischer Rohstoffe erreicht haben, fasst diese Abschlussbroschüre der Fördermaßnahme kompakt zusammen. Forschende aus Wissenschaft und Industrie arbeiteten Hand in Hand umsetzungsorientiert und umweltbewusst an innovativen technischen Verfahren und Wegen, das Angebot an wirtschaftsstrategischen Rohstoffen durch Forschung und Entwicklung nachhaltig zu erhöhen. Die Forschungsschwerpunkte reichen von der Suche und Erkundung primärer Rohstoffe bis zur Kreislaufführung sekundärer Rohstoffe.

GANZHEITLICHE PRAXISNAHE FORSCHUNG

Nachwuchsforscherguppen herausragender junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler gingen die Zielstellung naturwissenschaftlich (BakSolEx, GRAMM) und sozialwissenschaftlich (GORmin) an. Letztere betrachteten den wichtigen Aspekt der Akzeptanzforschung. Die Stärkung der deutschen Rohstofftechnologieforschung im internationalen Wettbewerb verfolgt das ebenfalls in r⁴ geförderte Netzwerk GERRI (German Resource Research Institute).

Vernetzend wirkt auch das Integrations- und Transferprojekt r⁴-INTRA, das durch gezielte Öffentlichkeitsarbeit und Potenzialanalysen zur Effizienzsteigerung der Fördermaßnahme beiträgt.

PROJEKTCLUSTER Primärrohstoffe

• Suche und Erkundung von Primärrohstoffen

Moderne Explorationsmethoden, verbunden mit steigendem Bedarf an wirtschaftsstrategischen Metallen für die Hightech-Industrie, rücken die klassischen deutschen Erzlagerstätten im Erzgebirge, Harz, Schwarzwald oder Siegerland wieder in den Fokus wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Interesses. Niedrige Metallpreise, Umweltaspekte, sinkende Metallgehalte in den Erzkörpern und zunehmende Abbautiefen führten Anfang der 1990er Jahre zur Einstellung des Erzbergbaus in Deutschland und zum Ende weiterer Erkundungen. r⁴ bewertet die heimischen Rohstoffpotenziale neu. Dieses geschieht auf der Grundlage vorhandener Lagerstättenkenntnisse, kombiniert mit weiterentwickelten Methoden und Modellen. Schwerpunkte liegen dabei unter anderem auf der Tiefensondierung von Lagerstätten sowie auf der Erforschung bisher wenig berücksichtigter Anreicherungen wirtschaftsstrategischer Metalle

• Gewinnung und Aufbereitung von Primärrohstoffen

Bergbau ist material- und kostenintensiv. Moderne, ressourceneffiziente Gewinnungs- und Aufbereitungsverfahren sind daher entscheidende wirtschaftliche Voraussetzungen im internationalen Primärrohstoffabbau.

In r⁴ werden neue Verfahren und Konzepte zur hochselektiven Gewinnung sowie zur Automatisierung von Prozessabläufen erforscht und bestehende Aufbereitungsverfahren weiterentwickelt. Besondere Bedeutung kommt der Erschließung polymetallischer Indium-Wolfram-Zinn-Komplexerze in Sachsen zu, die bislang wegen ihrer feinkörnigen Verwachsung der Minerale als nicht aufbereitbar galten. Mengenmäßig handelt es sich um Vorkommen im Weltmaßstab. Hier eröffnet r⁴ neue Perspektiven mit internationaler Reichweite.

Ziel ist es auch die Sicherheit im Bergbau weiter zu optimieren und die Umweltverträglichkeit im Sinne der Nachhaltigkeit zu erhöhen. Eine Verbesserung dieser Faktoren stärkt zudem die öffentliche Akzeptanz für die Rohstoffgewinnung.

Sekundärrohstoffe

• Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen

Aus „Abfall“ wird Rohstoff. Aufbereitungs- und Produktionsrückstände können erhebliche Mengen an wirtschaftsstrategischen Rohstoffen enthalten.

Deutschland blickt auf eine lange Bergbau- und Hüttentradition zurück. Ein Erbe sind zahlreiche sekundärrohstoffhaltige Ablagerungen, die heute teils bedeutende Rohstoffquellen darstellen. In Aufbereitungsrückständen früheren Erzbergbaus und der Verhüttung in Deutschland finden sich abhängig von der jeweiligen Lagerstätte Kobalt, Indium, Rhenium, Silber und weitere wertvolle Stoffe.

Gegenwärtig anfallende produktionsspezifische Abfälle mit entsprechenden Metallen bilden vielerorts ungenutzte Ressourcen. Diese gilt es zu erschließen: Aktuell beträgt allein in deutschen Müllverbrennungsanlagen das jährliche Abfallaufkommen circa 130.000 Tonnen Flugasche. Enthaltenes Zinn, Kupfer, Gallium, Germanium und Wolfram werden mit deponiert.

PROJEKTCLUSTER	BETEILIGTE VERBUNDPROJEKTE
Suche und Erkundung von Primärrohstoffen	DESMEX GEM HiTEM HTMET MinNoBeck REEMAP ResErVar WISTAMERZ
Gewinnung und Aufbereitung von Primärrohstoffen	AFK ELIZE OptiWiM SEEsand SE-FLECX SEM ² UPNS4D+
Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen	ARGOS BiRec EcoGaIN ELEXSA GRAPHIT 2.0 Lan-TeX MetalSens MinSEM REWITA SESAM Theisenschlamm TransTech VAFLOW
Kreislaufführung von Altprodukten	AddResources AgREE DIBRAS gagendta+ MEXEM NeW-Bat SEMAREC
Flankierende Maßnahmen	r ⁴ -INTRA GERRI BakSolEx GORmin GRAMM

• Kreislaufführung von Altprodukten

Elektroaltgeräte und Elektronikschrott als End-of-Life-Abfall enthalten in meist geringer Konzentration eine Vielzahl strategisch wichtiger Rohstoffe. In Computerchips finden sich bis zu 60 chemische Elemente. Weniger als ein Prozent davon werden aktuell zurückgewonnen und wiederverwertet. Komplexes Produktdesign, unterschiedliche Materialien und Beschichtungen erfordern bei der Demontage und Trennung kreative Lösungen. Das Recycling des Seltenerd-Elements Neodym aus Magneten und die Rückgewinnung von Silber aus Elektrolyseelektroden sind Beispiele dieses r⁴-Forschungsschwerpunktes.

Kreislaufführung senkt die Abhängigkeit von Rohstoffimporten, begrenzt den Verbrauch natürlicher Ressourcen, ist klimafreundlicher und schont somit die Umwelt. Sekundäre Reststoffe sind die „Lagerstätten“ der Zukunft, wobei Kreisläufe durch das direkte Recycling anfallender Altprodukte geschlossen werden.

QUERSCHNITTSTHEMEN

• Förderung von Nachwuchsgruppen

Nach Nachwuchswissenschaftlern bot die BMBF-Fördermaßnahme r⁴ ein Forum, sich kreativ mit dem Thema „Ressourceneffizienz und wirtschaftsstrategische Rohstoffe“ zu befassen. Die Hochschule Pforzheim begleitete die Jungforscher. Eine Idee der Begleitforschung und erfolgreiches Ergebnis der BMBF-Nachwuchsförderung ist die Kongress-Reihe „24h für Ressourceneffizienz“.

• GERRI (German Resource Research Institute)

Ein nationales Netzwerk der Expertise im Bereich metallischer und mineralischer Rohstoffe baut das r⁴-geförderte Projekt German Resource Research Institute (GERRI) auf. Es stimmt die Aktivitäten der deutschen Rohstoffforschung ab und agiert besonders als Schnittstelle zur EIT KIC – Raw-Materials (European Institute of Innovation & Technology – Knowledge and Innovation Community), einer europäischen Wissensgemeinschaft im Bereich Rohstoffe.

INTEGRATIONS- UND TRANSFERPROJEKT r⁴-INTRA

Aufgabe des Integrations- und Transferprojekts r⁴-INTRA ist es zu vernetzen, die Innovationskraft der r⁴-Verbundprojekte in Hinblick auf ihre industrielle Umsetzung zu stärken und die Ergebnisse zu kommunizieren. Dies geschieht über branchen-, technologie- und themenorientiertes Clustern der Einzelprojekte und breit gefächerte Öffentlichkeitsarbeit. Fachliche Synergien werden gebündelt und Handlungsempfehlungen gegeben.

Federführend sind in r⁴-INTRA das CUTEC Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum der TU Clausthal und zugleich Verbundkoordinator, das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI sowie die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Beteiligt sind zudem das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und die Hochschule Pforzheim (HSPF).

Kontakt

Prof. Dr. Daniel Goldmann (Verbundkoordinator r⁴-INTRA), Dr. Torsten Zeller, CUTEC Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum, Clausthal-Zellerfeld, Tel. +49 5323 72-6206 | E-Mail: torsten.zeller@cutec.de

Dr. Katrin Ostertag, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe, E-Mail: katrin.ostertag@isi.fraunhofer.de

Dr. Hildegard Wilken, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, E-Mail: hildegard.wilken@bgr.de

Dr. Simon Glöser-Chahoud, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, E-Mail: simon.gloeser-chahoud@kit.edu

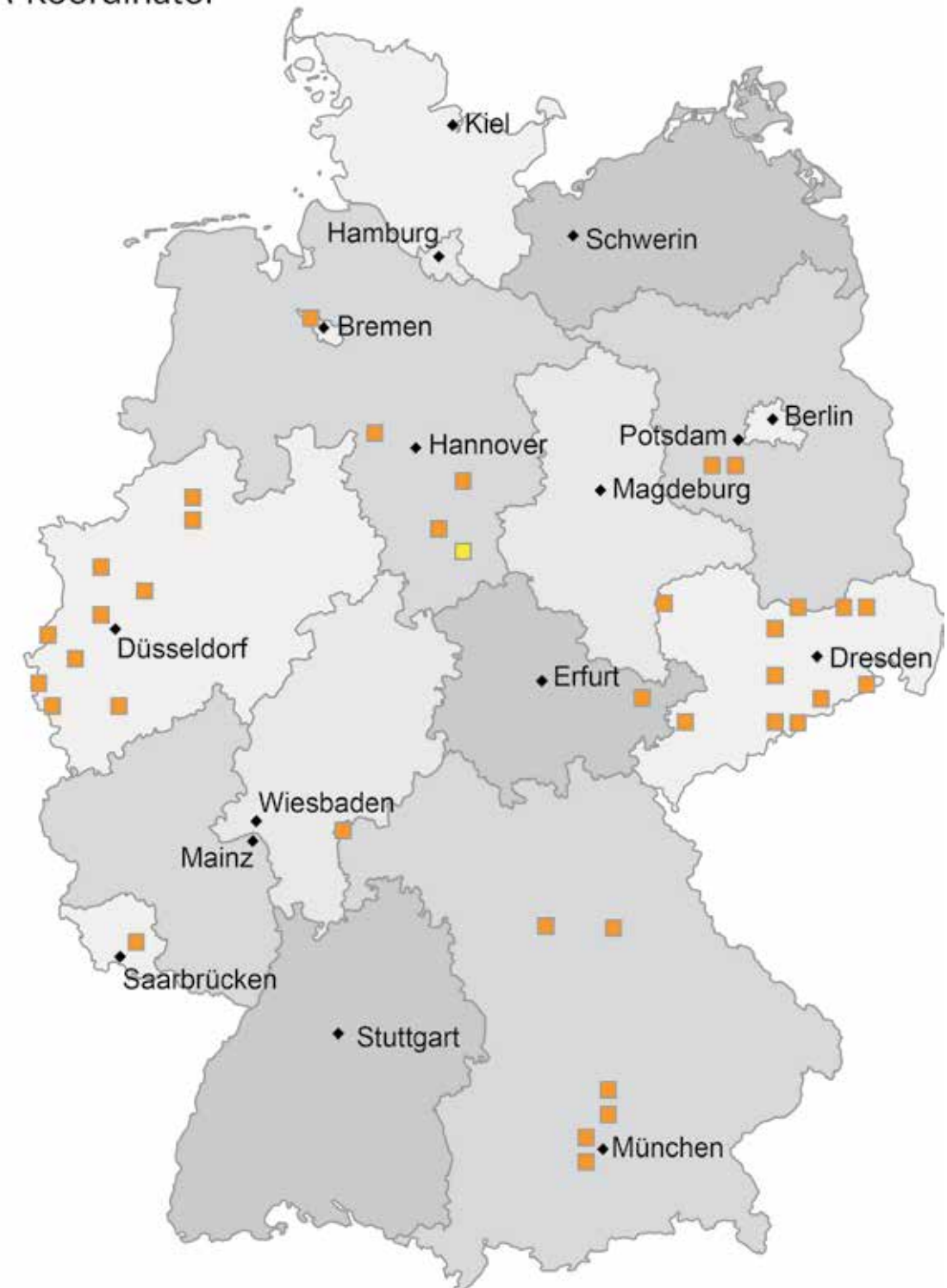
Prof. Dr. Jörg Woidasky, Hochschule Pforzheim, Pforzheim, E-Mail: joerg.woidasky@hs-pforzheim.de

Internet

www.r4-innovation.de

Legende:

- Verbundkoordinator
- r⁴-INTRA-Koordinator





r⁴-Verbundprojekte

Suche und Erkundung von Primärrohstoffen

- ▶ DESMEX
- ▶ GEM
- ▶ HiTEM
- ▶ HTMET
- ▶ MinNoBeck
- ▶ REEMAP
- ▶ ResErVar
- ▶ WISTAMERZ

DESMEX

Elektromagnetische Tiefensondierung für die Lagerstättenerkundung

Zielstellung

Im noch unbekannten tieferen Untergrund besteht auch in Deutschland ein Potenzial für mineralische Rohstoffvorkommen. Doch wie können Erzlagerstätten in Tiefen von vielen hundert Meter effizient erkundet werden? Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Verbundprojektes DESMEX entwickelten dazu ein neues geophysikalisches Messverfahren, das eine effiziente Tiefenerkundung des geologischen Untergrundes mit vom Hubschrauber geschleppten Instrumenten kombiniert mit starken Sendern am Boden erlaubt. Das Hauptziel des Projektes bestand darin,

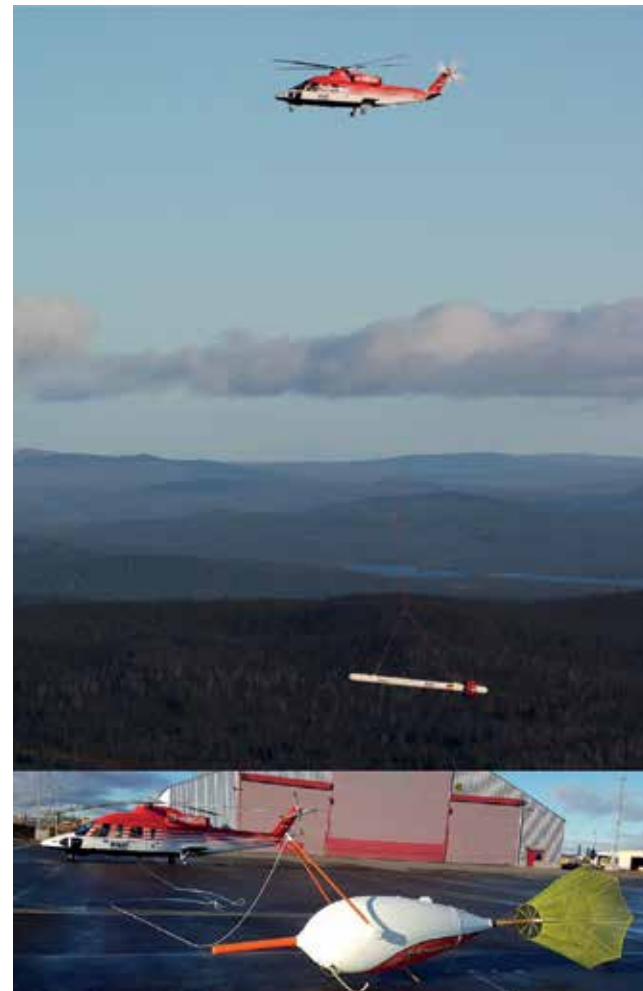


Abb. 1: DESMEX-Flugsonden in Kiruna (Nordschweden) mit 3D-Vektormagnetometern, Fotos: Supracon AG (unten), Michael Becken (oben)

Aussagen über Lagerstätten in bis zu 1.000 m Tiefen treffen zu können, etwa doppelt so tief wie mit bisher verfügbaren Hubschrauberverfahren.

Ergebnisse

Die Befliegung eines Messgebietes mit den hubschrauber-gestützten Instrumenten bietet ein eindrucksvolles Schauspiel (Abb.1), auch für die routinierten Geländeteams am Boden. Schließlich fliegt der Hubschrauber über 100 km/h über das Messgebiet und zieht jeweils eine der beiden bis zu zehn Meter langen Schleppsonden an einem Seil in 50 bis 80 m Höhe durch die Luft. So können an einem Tag bis zu 30 km² vermessen werden. Was den Betrachtern zumeist allerdings verborgen bleibt, ist der zweite, nicht weniger wichtige Bestandteil des Messsystems: das Geländeteam speist über Elektroden, welche über ein 1 bis 5 Kilometer langes Kabel verbunden sind, Wechselstrom in den Boden ein. Durch elektromagnetische Induktion in elektrisch leitfähigen Zonen im Untergrund wie Erzkörper, entstehen dadurch die Signale, die mit der jeweiligen Hubschraubersonde aufgefangen werden.

Die größte technische Herausforderung bei der Umsetzung des Messkonzepts bestand darin, auch die kleinsten Magnetfeldsignale im Flug messen zu können. Mit den speziell für DESMEX entwickelten Sonden und Sensoren können nun Magnetfelder gemessen werden, die eine Million Mal schwächer sind als das natürlich vorherrschende Erdmagnetfeld. Nur dadurch gelingt es, Signale auch noch im Abstand von mehreren Kilometern zu dem Bodensender zu registrieren und damit erst effiziente Hubschraubermessungen zu erreichen.

Es gibt aber auch noch einen anderen wichtigen Grund, warum große Abstände wichtig sind: Die Aussagetiefe, die mit den Messungen erreicht werden kann, wird zwar vor allem über die Frequenz des Stromsignals gesteuert; der Abstand zwischen der Schleppsonde und dem Stromsender spielt überdies eine wichtige Rolle. Die neuen Flugsonden erfüllen die hohen Anforderungen an die Messgenauigkeit, und die Testmessungen, die in dem Projekt erfolgten, zeigen, dass unter günstigen Be-

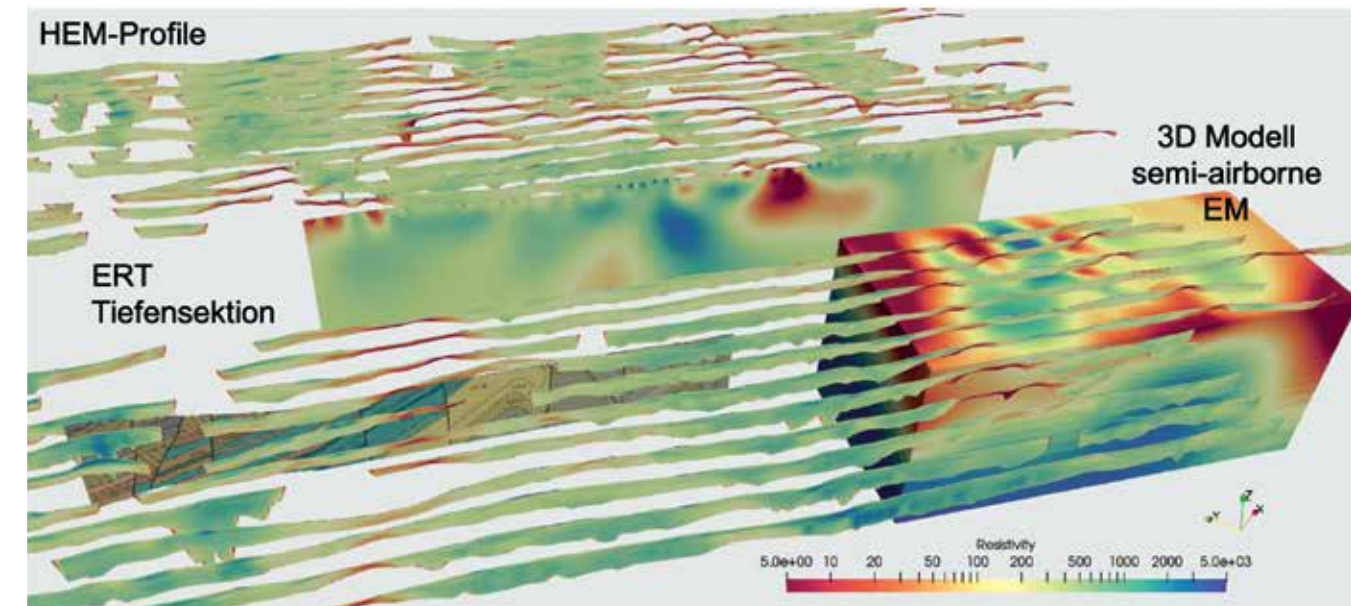


Abb. 2: Ergebnisse der Befliegungen: Kombiniertes 3D-Untergrundmodell aus der Region Schleich. Rötliche Farben kennzeichnen elektrisch leitfähige Zonen, die im Messgebiet vor allem auf Schwarzschieferhorizonte zurückzuführen sind, Quelle: Annika Steuer, BGR

dingungen elektrisch leitfähige Zonen in bis zu 1.500 m Tiefe erkannt werden können, sogar tiefer als ursprünglich geplant.

Aus den Messdaten werden mit computergestützten Auswerteverfahren Untergrundmodelle zur Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit berechnet. Auch diese Verfahren wurden in DESMEX entwickelt. Aufwändige Simulationsrechnungen des elektromagnetischen Induktionsproblems auf Hochleistungscomputern benötigen mehrere Tage Rechenzeit, bis schließlich ein dreidimensionales elektrisches Leitfähigkeitsmodell erstellt werden kann. Solche bildgebenden Verfahren müssen mehrfach angewandt werden, um die Aussagekraft des Modells beurteilen zu können – dies ist wichtig für die anschließende geologische Interpretation.

Die neuen Technologien und das Verfahren wurden im Projektverlauf ausgiebig und erfolgreich am Beispiel der Antimonit-Lagerstätte der Region Schleich in Thüringen (vgl. Abb. 2) sowie an der Eisenerzlagerstätte im schwedischen Kiruna mit Forschungsbefliegungen getestet. Die für beide Standorte ermittelten geophysikalischen Modelle können helfen, Probebohrungen gezielt abzuteufen. Dazu braucht es zusätzlich umfangreiche Laborarbeiten, in denen die neu erfassten Daten mit den mineralogisch/petrographisch-physikalischen Eigenschaften der Erzkörper und ihrer Rahmengesteine für das konkrete Untersuchungsgebiet abgeglichen werden, sowie dreidimensionale geologische Modellierungen. Die geophysikalische Tiefenerkundung mit den neuen DESMEX-Verfahren steht daher relativ am Anfang der Wertschöpfungskette bei der Erschließung von mineralischen

Rohstoffvorkommen. Nur die enge Zusammenarbeit verschiedener Geowissenschaften führt schließlich zu einem aussagekräftigen Lagerstättenmodell.

Ausblick

Die DESMEX-Technologien sind international einmalig und auf großes Interesse bei Explorationsfirmen weltweit gestoßen. Nicht nur für die Lagerstättenerkundung, sondern beispielsweise auch für die tiefe Grundwassererkundung planen die Verbundpartner eine Weiternutzung der Verfahren. Die Industriepartner sehen ein hohes Vermarktungspotenzial bei den neu entwickelten Sensoren und Instrumenten auch für andere geophysikalische Methoden. Zukünftig sollen die Technologien in ihrer Leistungsfähigkeit weiter verbessert werden. Damit soll es gelingen, auch natürliche Magnetfeldvariationen, die z.B. aus weltweiter Gewitteraktivität entsteht, zu nutzen.

Kontakt

Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Institut für Geophysik
Corrensstraße 24
48149 Münster
Prof. Dr. Michael Becken | Tel. +49 251 83-36137
E-Mail: michael.becken@uni-muenster.de
Projektlaufzeit: 01.03.2015 – 28.02.2019
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 106
Internet: www.uni-muenster.de/DESMEX

GEM

Granitgebundene Erze strategischer Metalle – Bildungsbedingungen und Ableitung innovativer Suchkriterien für verborgene Erzkörper

Suchkriterien schonen finanzielle Ressourcen

Magmatische Fraktionierung, Separation von spätmagmatischen Lösungen mit hohen Metallgehalten und Umwandlung des Nebengesteins durch diese Lösungen, begleitet von der Ausfällung der Metalle, stellen eine Serie von Prozessen dar, welche für die Bildung einer granitgebundenen Erzlagerstätte essentiell sind. Ob ein Granit überhaupt das Potenzial hat, eine Lagerstätte zu bilden, wird jedoch von Prozessen gesteuert, welche lange vor der magmatischen Fraktionierung stattgefunden haben. Diese Prozesse beinhalten die Bildung geeigneter Quellgesteine für die Metalle, die Akkumulation dieser Gesteine zu großen Volumen sowie Mobilisierung der Metalle durch partielles Schmelzen der Quellgesteine. Tritt ein einzelner Teilprozess nicht auf oder ist ineffizient, dann hat das betroffene Gebiet ein sehr geringes Potenzial eine Lagerstätte zu beinhalten. Deshalb kann das Fehlen der Voraussetzungen für einen einzelnen Teilprozess auf verschiedenen Skalen in der Exploration als Abbruchkriterium eingesetzt werden, womit finanzielle Ressourcen geschont werden können.

Voraussetzungen zur Bildung von Zinn-Wolfram-Lagerstätten

Die Verteilung von Erzelementen, z. B. Zinn (Sn) und Wolfram (W) zwischen Schmelze und Restit, hängt von den Schmelzbedingungen und der Restit-Mineralogie ab. Partialschmelzen, die sich durch Muskovit-Dehydratationsschmelzen (ca.

720-750°C) bilden, haben tiefere Sn- und W-Gehalte als der zugehörige Restit (Abb. 1), da freigesetztes Sn und W von Mineralen wie Biotit im Restit aufgenommen werden. Partialschmelzen die sich durch Biotit-Dehydratationsschmelzen bei höheren Temperaturen (ca. 820-850°C) bilden, haben hingegen höhere Sn- und W-Gehalte als der zugehörige Restit (Abb. 1). Werden die Partialschmelzen, welche sich bei tiefen Temperaturen bilden, aus dem System abgeführt, dann resultiert das Neuaufschmelzen des Restits in Schmelzen mit erhöhten Sn- und W-Gehalten. Die Anreicherung der Erzelemente Sn und W im Restit ist besonders effizient in Muskovit-reichen Gesteinen. Solche Gesteine bilden sich aus Ca- und Na-armen Sedimenten, die durch tiefgründige chemische Verwitterung auf stark erodierten Kontinenten entstehen. Damit diese verwitterten Gesteine später als Quellgesteine dienen können, müssen sie an den Kontinentrand umgelagert werden.

Tektonische Beanspruchung mobilisiert Metalle

Die Altersverteilung von detritischen Zirkonpopulationen stellt einen ausgezeichneten Tracer für die Herkunft von Sedimenten dar. Diese Altersverteilung zeigt, dass die Sedimente am Nordrand von Gondwana aus zwei Einzugsgebieten stammen und am westlichen bzw. östlichen Schelf abgelagert wurden. Während der variszischen Orogenese sind die beiden Schelfbereiche unterschiedlich beansprucht worden. Gebiete aus dem östlichen Schelf sind mit den bereits an Laurussia kollidierten Bereichen des westlichen Schelfs kollidiert, was

einerseits zu der geschwungenen Form des Variszischen Orogens geführt hat, andererseits aber auch die unterschiedliche Verteilung von Sn- und W-Erzen erklärt (Abb. 2). Der stärker beanspruchte westliche Schelf weist Sn-Erze und vereinzelt W-Erze auf, wohingegen der frühere östliche Schelf nur W-Erze aufweist. Die Verteilung von Sn- und W-Erzen impliziert, dass die Protilithe bestimmen, ob Vererzungen entstehen können. Die tektonische

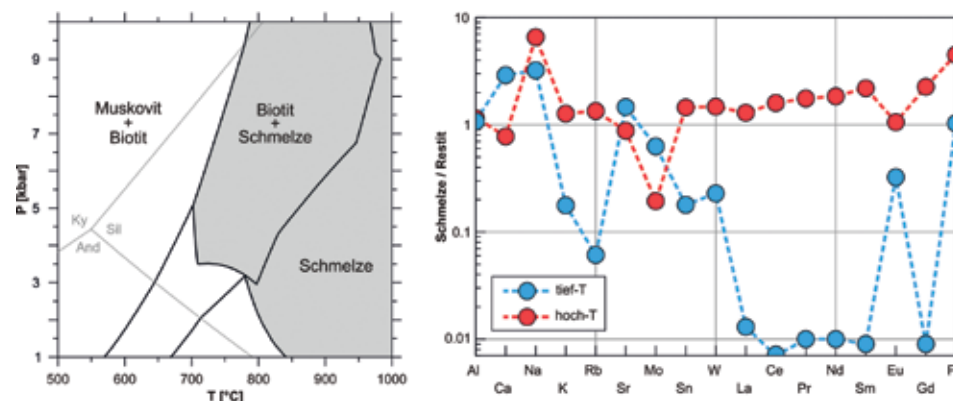


Abb. 1: (a) Druck- und Temperaturabhängigkeit der Schmelzbildung. (b) Verteilung ausgewählter Spurenelemente zwischen Schmelze (Granit) und Restit bei partiellem Schmelzen eines sedimentären Ausgangsgesteins bei tiefer und hoher Schmelztemperatur, Quelle: Wolf, 2018.

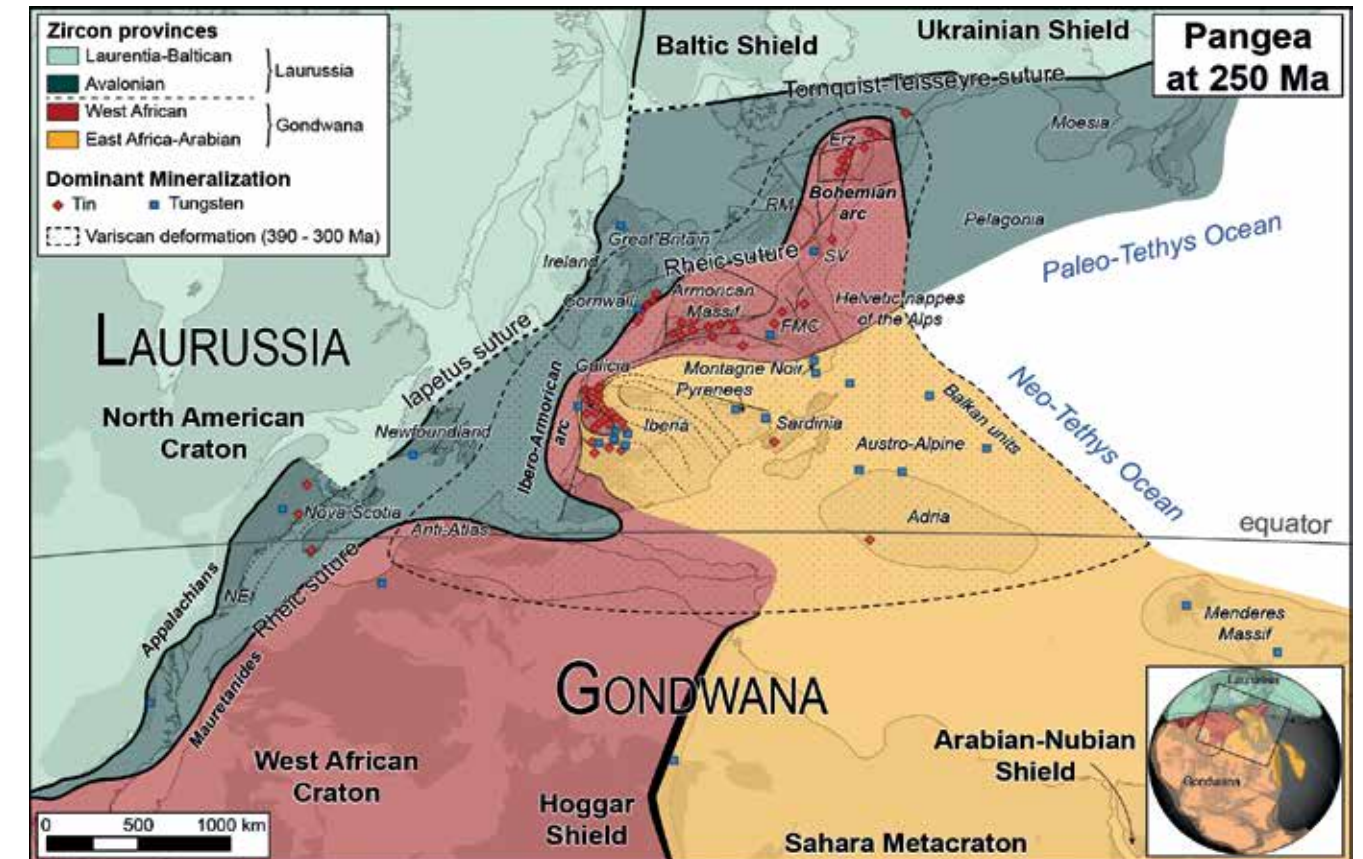


Abb. 2: Das Auftreten von Zinn- und Wolfram-erze ist durch die Verteilung von intensiv verwitterten Sedimentgesteinen in der Quelle der Granite kontrolliert. Die unterschiedliche tektonische Beanspruchung während der variszischen Orogenese resultierte in einer räumlich getrennten Entwicklung von Zinn- und Wolfram-erzen, Quelle: vereinfacht nach Stephan, 2018

Beanspruchung hingegen kontrolliert, welche Metalle aus der Quelle mobilisiert werden. Das ist dahingehend von praktischer Bedeutung als Sn und W oft unterschiedliche Erztypen ausbilden und deswegen bei der Prospektion unterschiedliche Suchstrategien angewandt werden.

Stressverteilung beeinflusst Bildung von Erzen

Die Stressverteilung in der oberen Kruste zum Zeitpunkt der Granitplatznahme hat großen Einfluss darauf ob sich Erze bilden oder nicht. Die Stressverteilung kontrolliert die Form der Intrusion und die Fluidzirkulation während der Abkühlung der Intrusion. Sn-Erze im Erzgebirge sind an Granite gebunden, bei denen σ_3 (Richtung des geringsten Druckes) horizontal angeordnet ist. Im Fichtelgebirge war σ_3 nicht horizontal und chemisch vergleichbare Granite sind nicht mineralisiert. Eine strukturelle Analyse erlaubt die Unterscheidung eines Suchgebietes in hoffige und nicht-hoffige Sektoren.

Neuer Ansatz für Suche nach Zinn-Erzen

Nach der klassischen Sichtweise bilden sich Skarne wenn Granite in Karbonatgesteine intrudieren und magmatische

Fluide Metalle in den sich dabei bildenden kontaktmetamorphen Gesteinen absetzen. Im Erzgebirge gibt es regionalmetamorphe Skarne, die älter als die Platznahme der Granite sind und trotzdem zeigen die silikatischen Skarnminerale deutlich erhöhte Sn-Gehalte. Dies bedeutet, dass Sn auch von metamorphen Fluiden transportiert wird. Exploration sollte deshalb nicht auf die Kontaktbereiche der Granite beschränkt sein.

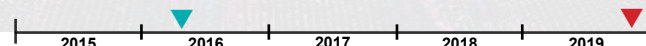
Kontakt

Deutsches GeoForschungszentrum
Telegrafenberg
D-14473 Potsdam
Prof. Dr. Rolf L. Romer | Tel. +49 331-288-1405
E-Mail: romer@gfz-potsdam.de
Projektlaufzeit: 01.06.2015 – 31.12.2018
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 108



HiTEM

Hochsensitives Messinstrument für die Transiente Elektromagnetik zur Exploration von tiefliegenden Mineralienvorkommen



Tiefere Einblicke eröffnen Chancen

Das Potenzial zur Erkundung von tiefer als 500 Meter liegenden Rohstoffvorkommen von der Erdoberfläche aus weisen nur wenige geophysikalische Verfahren auf. Ein bisher erfolgreich angewandtes Verfahren ist die sogenannte transiente Zeitbereichs- oder Pulselektromagnetik (TEM).

Für vulkanogene Massivsulfid-Lagerstätten (VMS) konnten bereits mit konventioneller Messtechnik Erkundungstiefen von bis zu wenigen hundert Metern erreicht werden. Diese VMS-Lagerstätten enthalten neben den Buntmetallen meist auch einen signifikanten Gehalt an Platin-Gruppen-Elementen, u. a. Platin, Palladium, Ruthenium, Iridium, Rhodium und Osmium. Allesamt wertvolle Hightech-Metalle, die für Zukunftstechnologien notwendig sind.

Elektromagnetische Verfahren, wie die TEM, sind für diesen Lagerstättentyp ausgezeichnet geeignet, da entsprechende Metalle eine erhöhte elektrische Leitfähigkeit aufweisen.



Abb. 1: HiTEM-System 1 (prototypisch) bereit zur Feldmessung, Foto: Supracon AG

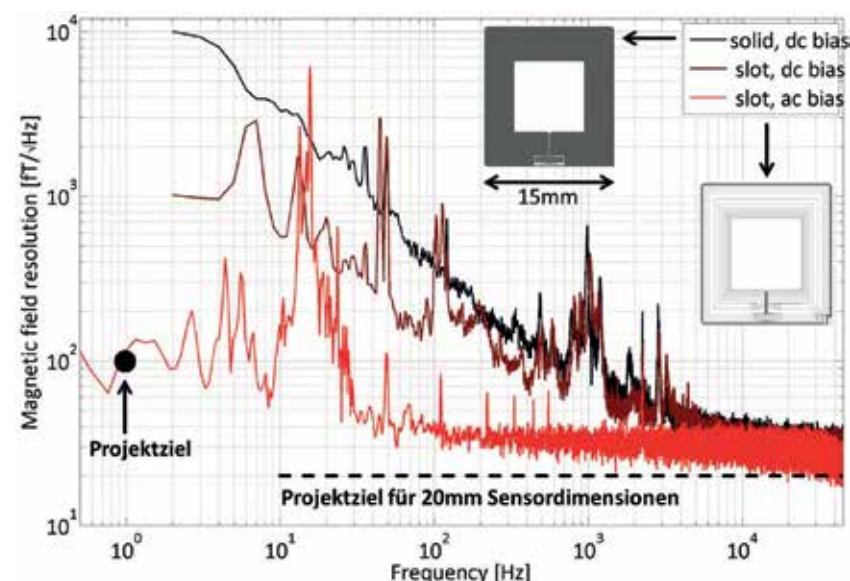


Abb. 2: Repräsentatives Rauschspektrum für einen 15 mm HTS-SQUID-Sensor für den noch kein Einsetzen des farbigen niederfrequenten Rausches zu erkennen ist. Mit den neuen 20 mm Sensoren können somit alle Projektziele bzgl. der Sensorik erreicht werden, Quelle Leibniz-IPHT

Durch die bisherige Limitierung der Explorationstiefe ist allerdings nicht nur bezüglich der VMS-Lagerstätten sehr wenig über die Tiefenerstreckung der Erzvorkommen bekannt. Dies trifft insbesondere für Deutschland zu, wo nach Jahrhunderten intensiven Bergbaus die oberflächlichen Ressourcen weitestgehend als erschöpft gelten.

Ergebnisse

HiTEM-Forschung hat diese Technologie weiterentwickelt, um weiter in die Tiefe vordringen zu können und massivsulfidische Lagerstätten samt Hightech-Metallen zu erkunden. Die mögliche Eindringtiefe der Messung wurde im Rahmen des Vorhabens nicht durch Steigerung des Transmittermomentes erreicht, sondern durch Steigerung der Empfindlichkeit der Sensoren und des gesamten TEM-Empfängers, insbesondere im Bereich niedriger Frequenzen und damit verknüpfter Nutzbarmachung später Messzeiten nach Abschalten des Transmitterpulses. Dies geschieht mit Hilfe von supraleitenden Quanteninterferenz-

detektoren (SQUID), hergestellt mit Hochtemperatursupraleitenden (HTS) Materialien. Die Entwicklung robuster, rauscharmer HTS-SQUID-Sensoren war Bestandteil der Arbeiten des Leibniz-IPHT und wurde erfolgreich realisiert. Die neuen Sensoren sind einfacher und in weniger Prozessierungsschritten aufzubauen und damit kostengünstiger. Dazu wurden neue Technologien in der Fertigungsstrecke implementiert.

Die Leistungsfähigkeit der Sensoren konnte mit der grundlegend überarbeiteten und angepassten Empfängerelektronik charakterisiert werden. Erstmals wurde eine Steuerungselektronik auf Basis des AC Bias für alle drei Sensoren entwickelt und realisiert (Abb. 1). Im Zusammenspiel von Sensoren und Elektronik konnte das Systemrauschen insbesondere im niederfrequenten Frequenzbereich reduziert und so eine hohe Signalgüte und damit verbunden eine größere Erkundungstiefe erreicht werden. Die Steuerungselektronik wurde weiter digitalisiert und in eine browserbasierte Lösung überführt, so dass jetzt keine aufwendige Installation von zusätzlicher Software zur Einstellung der Systeme und Systemparameter erforderlich ist.

Ergebnisse zu den verbesserten Systemparametern konnten bereits ermittelt und validiert werden (Abb. 2). Feldmessungen über repräsentativen Targets des VMS-Lagerstättentyps in Finnland dienen dazu, diese Ergebnisse zu verifizieren und die entwickelten innovativen Verfahren zur Reduzierung des elektromagnetischen Rauschens im entsprechenden Frequenzbereich für TEM zu überprüfen und zu validieren.

Zudem gelang es neue Inversions- und Interpretationsverfahren weiterzuentwickeln und zu implementieren.

Ausblick

Die Projektergebnisse belegen, dass die Erwartungen der beteiligten Partner erfüllt wurden. Vor diesem Hintergrund geht Supracon davon aus, dass hier eine neue, robuste Technologie entwickelt wurde, die es den Explorationsdienstleistern und Bergbau-Unternehmen ermöglicht noch genauere Aussagen zu potenziellen Vorkommen liefern zu können (Abb. 3). Damit einher geht auch eine potenzielle Reduktion von erforderlichen Bohrlöchern, da eine genauere Bestimmung der erwarteten Vorkommen möglich ist.



Abb. 3: Robust und hochempfindlich: „HiTEM“ entwickelt ein neues Messsystem, Foto: Supracon AG

Kontakt

Supracon AG
An der Lehmgrube 11
07751 Jena
Jens Kobow | Tel. +49 3641 2328-124
E-Mail: jens.kobow@supracon.com
Projektlaufzeit: 01.05.2016 – 31.10.2019
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 110

HTMET

Hochtechnologie-relevante Metalle in deutschen sulfidischen Buntmetallerzen – Ressourcenpotenzialabschätzung

Auf Spurensuche in heimischen Bergbaurevieren

Welche Hightech-Spurenmetalle schlummern noch in deutschen Erzlagerstätten? Gibt es regionale Verteilungsmuster oder wirtschaftlich gewinnbare Anreicherungen? Antworten auf diese spannenden Fragen fügte das Verbundprojekt HTMET zu einem deutschlandweiten Rohstoffkataster zusammen.

Umfangreiches Probenmaterial aus historischen Sammlungen sowie aktueller Probenahmen in heimischen Bergbaurevieren bildeten die Grundlage für die Bestandsaufnahme des Rohstoffpotenzials. Rund 500 Erzproben von 109 Standorten aus elf historischen deutschen Erzdistrikten (Abb. 1) und aus angrenzenden EU-Ländern (Österreich, Belgien) wurden vorbereitet und chemisch analysiert, sowie drei Großproben für Aufbereitungstests im Labormaßstab genutzt.

Ergebnisse

Die Abschätzung des Hightech-Metallrohstoffpotenzials von Buntmetallerzen in historischen deutschen Bergbaudistrikten für eine mögliche zukünftige und rohstoffeffiziente Nutzung



Abb. 1: Erzdistrikte und definierte Cluster von Untersuchungsstandorten in Deutschland im Projekt HTMET (Kreise innerhalb der Erzdistrikte: Cluster von A bis AI). Zusätzlich Cluster U in Belgien (Plombières – Kelmis (La Calamine)). Quelle: GeoBasis – DE/BKG 2018

aller Lagerstätteninhalte erfolgte anhand der Mineralogie der Spurenelementträger, deren Gehalten, der lokalen Verteilung und regionaler Verbreitungsmuster der Hightech-Elemente, standortcharakterisierender Faktoren und vorläufiger Konzepte für Aufbereitungsprozesse.

Grundlegend für weitere Arbeiten ist die Erkenntnis, dass die Minerale Sphalerit ((Zn,Fe)S) und Chalkopyrit (CuFeS₂) in den bearbeiteten Proben die wichtigsten Träger der Hightech-Spurenelemente darstellen. Ihre Häufigkeit und Verteilung floss somit in eine Klassifizierung wichtiger Erztypen für jeden Standort und in die Aufbereitungsplanung ein.

Die Gehalte der Spurenelemente Indium, Gallium und Germanium in diesen Mineralen lagen vorwiegend im Bereich weniger Gramm des Elements pro Tonne des Erzminerals, konnten aber bei spurenelementreichen Erzen mehr als die hundertfache Konzentration erreichen.

Ein besonders wichtiges Teilergebnis bildete der Beleg, dass Spurenelemente in Buntmetallerzen der deutschen Erzdistrikte deutliche Muster regionaler An- und Abreicherungen zeigen, abhängig vom Bildungsprozess der Lagerstätte und von der jeweiligen regionalen Geologie des Distrikts, wie auftretenden Nebengesteinen.

Hydrothermale Blei-Zink-Erze des Schwarzwaldes und des Ruhrgebietes enthielten im Sphalerit neben erhöhten Galliumgehalten auch Anreicherungen von Germanium. Karbonatgebundene Buntmetallerze des Aachen-Kelmiser-Reviere und des Odenwaldes besitzen Germanium-Anreicherungen. Granitbezogene Skarnlagerstätten, aber auch hydrothermale Erzgänge des Erzgebirges, zeigten erhöhte Indiumwerte.

Aufbereitungsuntersuchungen Gallium-Indium-haltiger Buntmetallerz-Großproben aus Lautenthal im Oberharz zeigten, dass eine flotative Anreicherung der Haupt- und Hightech-Spurenmetalle erfolgreich möglich ist. Es wurden Ausbringen für Zink von 96 %, für Gallium zwischen 75 % und 95 % sowie für Indium von 95 % erzielt. Nach Rösten der Konzentrate erfolgte eine schwefelsaure Laugung, bei der zwischen 91 % und 97 % der Zielmetalle in Lösung gingen. Tests zur ionenselektiven Trennung mittels Ionenaustauscherharzen wiesen erste positive Ergebnisse auf.

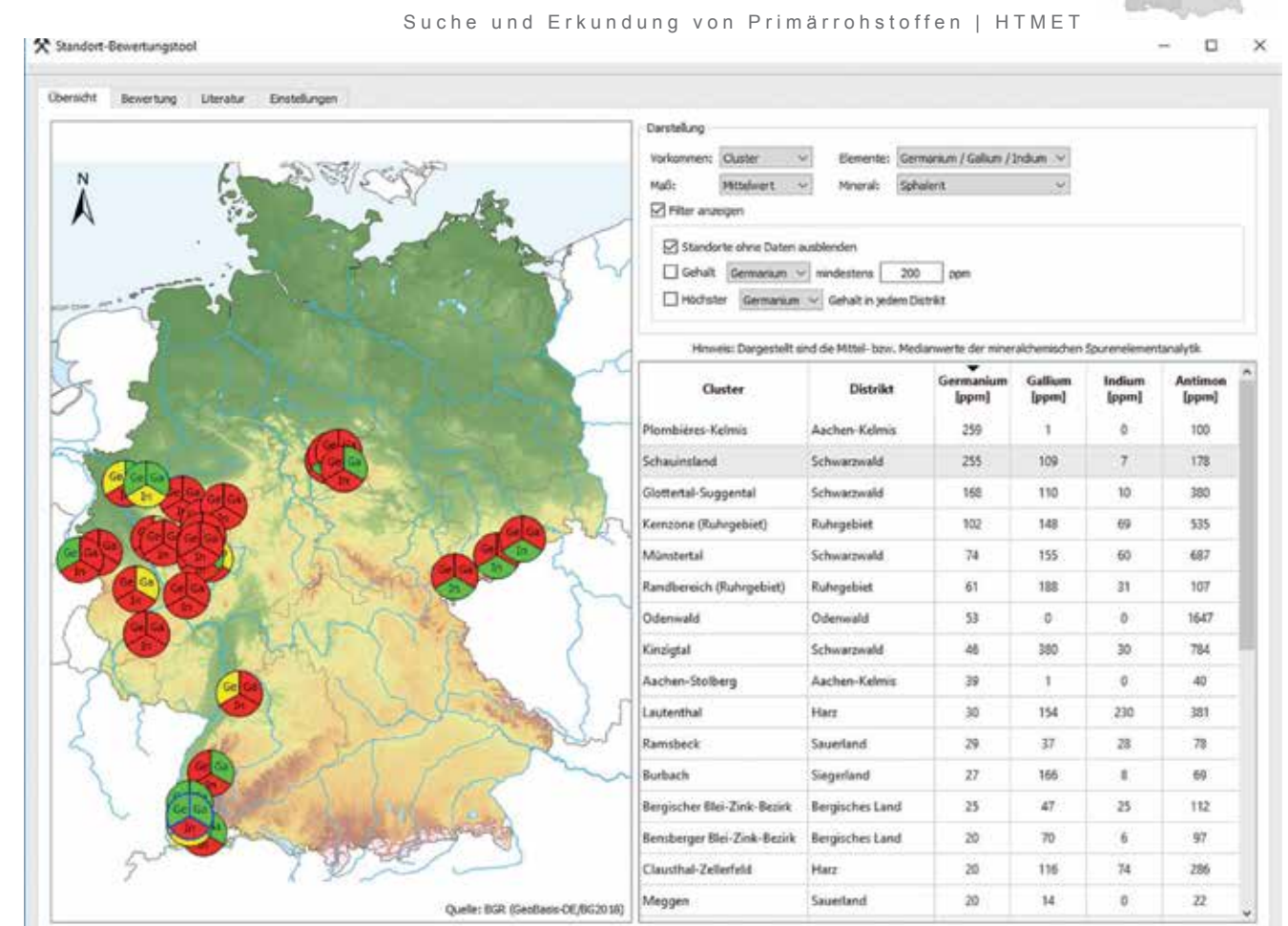


Abb. 2: Auswertungs- und Bewertungstool des Rohstoffkatasters: hier Darstellung der Hightech-Spurenelementdaten für Einzelpunktanalytik am Mineral Sphalerit auf der Deutschlandkarte (Farbcodierung der Gehalte (Mittelwerte) für Cluster nach Ampelsystem: grün = erhöht bis rot = gering) sowie mittels Listenanzeige sortiert nach absteigenden Gehalten. Die Daten zum Cluster U in Belgien sind zum wissenschaftlichen Datenvergleich ergänzt. Quelle: CUTEK, BGR.

Kataster mit Bewertung des Hightech-Rohstoffpotenzials

Das geochemisch-mineralogisch-ökonomische Kataster (GMWK) des aktuellen Hightech-Rohstoffpotenzials in Deutschland wurde in Form einer umfangreichen Datenbank erstellt. Aufgelistet sind erzbezogene die Gehalte an primären Wertmetallen in den betrachteten Lagerstätten sowie Standortfaktoren und Aufbereitungseigenschaften. Eine eigens entwickelte Benutzeroberfläche erlaubt die Verwaltung und Visualisierung der Daten (Abb. 2). Die Gehalte der Spurenmetalle werden vergleichend in Dreiecksdiagrammen dargestellt und umfangreiche Datenblätter der Lagerstätten automatisch generiert. Anhand dieser Daten wird das heimische Potenzial metallischer Hightech-Rohstoffe bewertet – wichtig etwa für Geologische Dienste der Bundesländer.

Ausblick

Regionen mit Potenzial für Explorationsarbeiten sind in den untersuchten Distrikten vorhanden. Das Rohstoffkataster mit integriertem Bewertungskonzept weist auf Möglichkeiten für

Explorationsaktivitäten hin und berücksichtigt Aspekte der Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz. Eine wirtschaftliche Gewinnung von Metallrohstoffen hängt jedoch in erster Linie vom Weltmarktpreis ab. Weiterhin setzt eine Wiederaufnahme des Metallbergbaus bergrechtliche Genehmigungsverfahren und umfangreiche Investitionen in neue bergbauliche Anlagen voraus.

Kontakt

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Stilleweg 2
30655 Hannover
Priv.-Doz. Dr. Torsten Graupner | Tel. +49 511 643 2569
E-Mail: torsten.graupner@bgr.de
Projektlaufzeit: 01.05.2015 – 31.12.2018
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 110

MinNoBeck

Ressourcenpotenzial verdeckter hydrothermaler Mineralisationen im Norddeutschen Becken

Zielstellung

Im Rahmen des Projekts „MinNoBeck“ wurden erstmals Gesteinsproben und Formationswässer aus Bohrungen im Bereich des Norddeutschen Beckens in Hinblick auf ihre Gehalte an Hochtechnologiemetallen untersucht. Das Norddeutsche Becken erstreckt sich von der Nord- und Ostsee bis an den Rand der Mittelgebirge im Süden und stellt eine der wichtigsten Erdöl- und Erdgasprovinzen Europas dar. Dass es Anreicherungen von Blei-, Zink- und Kupfererzmineralen gibt, war durch tiefe Erkundungsbohrungen auf Erdöl und Erdgas bereits bekannt. MinNoBeck hat nun untersucht, welche weiteren Metalle die Mineralisationen in den Bohrkernen sowie die Wässer enthalten und wie sich diese bildeten.

Ergebnisse

Mineralisationen in den Bohrkernen mehrerer Beprobungskampagnen konnten untersucht werden. Hierbei wurden Blei-, Zink-, und Fluoriterze nachgewiesen. Die Spurenelementanalysen deuten darauf hin, dass es sich bei einigen Mineralisationen im Norddeutschen Becken um Vorkommen handelt, die den Mississippi-Valley-Typ (MVT) Blei-Zink Lagerstätten, zu denen auch weltweit bekannte Lagerstät-

ten in Illinois und Kentucky in den USA beziehungsweise in Irland und England zählen, sehr stark ähneln. Die Fluideinschlüsse sowie die Fraktionierung der Seltenen Erden in den Gangartmineralen weisen zumeist nicht auf anomal hohe Bildungstemperaturen hin und liegen im Bereich von 50 °C bis 200 °C. Nur in einigen räumlich eng begrenzten Mineralisationen deuten Spurenelemente in Gangarten auf Bildungstemperaturen oberhalb von 250 °C und somit auf eine zusätzliche Wärmequelle wie eine tiefliegende magmatische Intrusion. Dies kann einen entscheidenden Einfluss auf die Fluidentwicklung in einzelnen Teilen des Beckens gehabt haben. Untersuchungen der Schwefel- und Kohlenstoffisotope zeigten, dass sich die Mineralisationen im Wesentlichen durch eine Vermischung metallreicher Beckensolen mit Schwefelwasserstoff gebildet haben. Der benötigte Schwefel wurde hierbei durch eine thermochemische Reduktion aus den Zechsteininformationen freigesetzt. Die rezenten Formationswässer aus dem Rotliegenden ähneln in ihrer Isotopen- und Spurenelementzusammensetzung deutlich den in den Bohrkernen angetroffenen, ca. 160 Millionen Jahre alten Fluoritmineralisationen. Dies deutet auf eine Bildung aus ähnlichen Beckenfluiden oder auf eine gemeinsame Metallquelle hin. Die Formationswässer sind darüber hinaus stark angereichert an dem „Batterierohstoff“ Lithium. Die Konzentrationen übersteigen sogar die in den USA in vergleichbaren Wässern auftretenden Werte.



Abb. 1: MinNoBeck-Wissenschaftler bei der Untersuchung von Bohrkernen aus dem Norddeutschen Becken, Foto: D. Krämer, Jacobs University Bremen

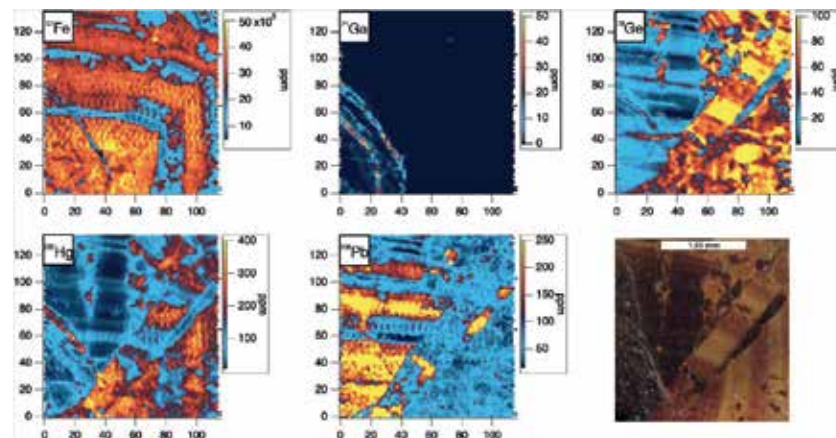


Abb. 2: Mikrograph einer Zinkblende aus dem Norddeutschen Becken und Ergebnisse eines Elementmappings mittels Laserablations-ICPMS, Quelle: P. Nadoll, Universität Erlangen

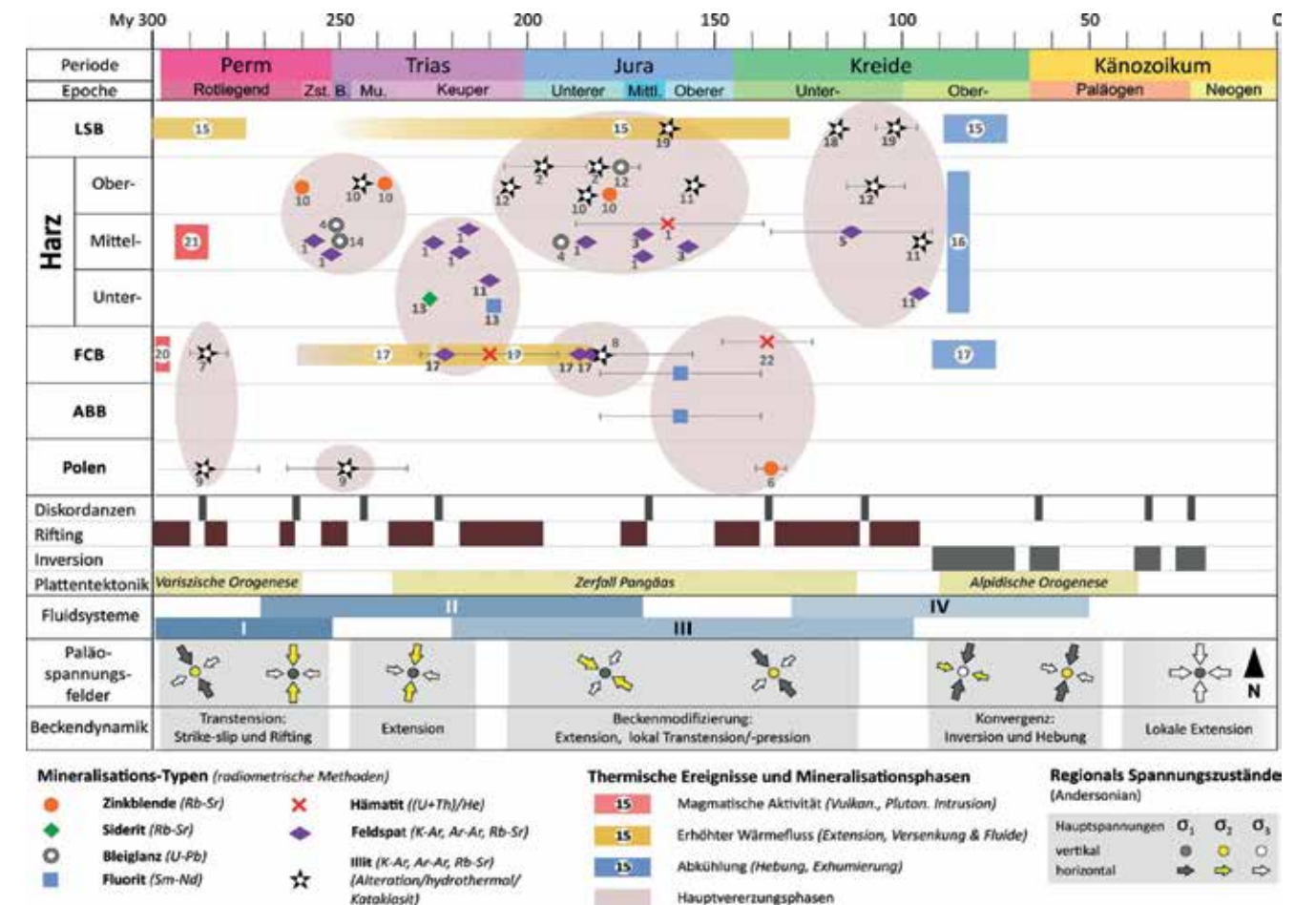


Abb. 3: Zusammenstellung der berechneten und modellierten Alter der hydrothermalen Mineralisationen im Norddeutschen Becken und Harz im Kontext der Beckenentwicklung. Referenzen siehe Nadoll et al. (2019), Quelle: F. Duschl, Universität Göttingen

Ausblick

In Bohrkernen aus dem Norddeutschen Becken wurden an mehreren Stellen und in unterschiedlichen Gesteinsformationen Blei-, Zink-, sowie Fluoriterze in Tiefen von bis zu 4000 m nachgewiesen. Die angetroffenen Mineralisationen sind nicht abbauwürdig und es konnten keine wesentlich erhöhten Gehalte an Hochtechnologiemetallen wie den Seltenen Erden, Gallium, Germanium oder Indium nachgewiesen werden.

Die Erkundung abbauwürdiger Mineralisationen unter mächtiger Bedeckung ähnelt sehr der Suche nach einer Nadel im Heuhaufen. Daher sind Technologien zur Exploration dieser verdeckten Lagerstätten stark nachgefragt. Rekonstruierte Bildungsparameter können entscheidend zum Auffinden solcher „Nadeln“ beitragen. Eine geowissenschaftliche Untersuchung, etwa der Wässer der Erdöl- und Erdgasindustrie, kann wichtige Aussagen zum Antreffen möglicher Mineralisationen im tiefen Untergrund, beispielsweise in Störungszonen, liefern. Die Geochemie der Wässer und deren Relation zur Mineralogie und zu Fluideinschlüssen in Gängen

und Gangarten sind damit wichtige Werkzeuge in der Lagerstättenexploration. Solche Anzeiger liefern wichtige Indizien zum Auffinden bis dato unbekannter Lagerstätten unter tiefer Sedimentbedeckung. Darüber hinaus könnte es sich bei den Wässern um eine potenzielle heimische Lithium-Ressource handeln – für eine endgültige Evaluation sind aber noch grundlegende Fragen der Gewinnbarkeit zu klären.

Kontakt

Jacobs University Bremen gGmbH
Department for Physics and Earth Sciences
Campus Ring 1
28759 Bremen
Prof. Dr. Michael Bau | Tel. +49 421 200-3564
E-Mail: m.bau@jacobs-university.de
Projektlaufzeit: 01.05.2016 – 31.12.2019
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 112

REEMAP

Hyperspektralanalyse Seltener Erden

Spektroskopische Detektion Seltener Erden in Ihren Lagerstätten

Die Hochtechnologie-Industrie stellt die Rohstoffsicherung und Gewinnung vor neue Herausforderungen. In zunehmendem Maße werden neue Techniken in der Prospektion, Exploration und im Abbau von industriekritischen Rohstoffen, wie den Seltenen Erden (SEE) benötigt, die eine möglichst umweltschonende Erkundung bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung ermöglichen. Die abbildende Spektroskopie bietet hierfür einen innovativen Lösungsansatz an, der erstmalig die In-situ Charakterisierung der SEE und der assoziierten Mineralogie ermöglicht. Hierbei können für das menschliche Auge nicht sichtbare Vererzungen und Mineralgradienten spektral und räumlich verfolgt und semi-quantifiziert werden (siehe Abb. 1).

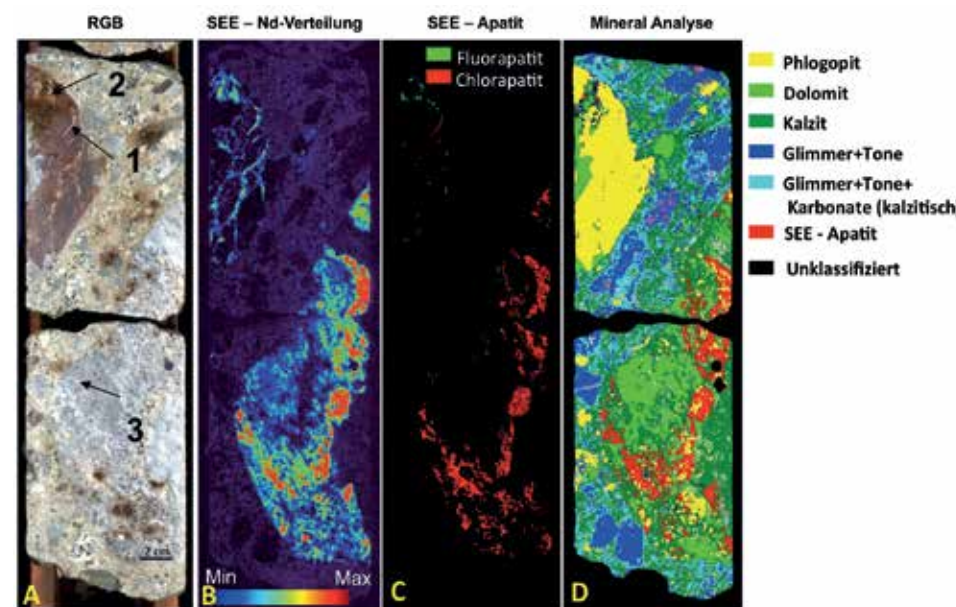


Abb. 1: Scan und Analysen eines Bohrkerns aus der SEE-Lagerstätte Storkwitz. Links: RGB-Darstellung der Sensordaten. Mitte: Nd-Verteilung auf der Bohrkernprobe (links) und Verteilung der Apatite auf der Probe (rechts). Rechts: Mineralogie klassifiziert aus den abbildenden Spektrometerdaten, Quelle: Dr. Martin Schodlok, BGR

Zu diesem Zweck wurden mehrere modulare Werkzeuge entworfen, die eine Mineral- und Elementbestimmung aus abbildenden Spektrometerdaten ermöglichen. Diese Werkzeuge, die in einer Multisensor-Prozesskette ineinandergreifen, ermöglichen eine großflächige, zeitnahe und zuverlässige Detektion der SEE.

Ergebnisse

REEMAP wurde anhand von Arbeiten an verschiedenen Seltenerdlagerstätten entwickelt, wie dem Fen-Karbonat-Komplex in Norwegen und dem Alkalimagmatit-Komplex von Norra Kärr (Schweden). Zudem erfolgten umfassende spektroskopische und unterstützende mineralogisch-geochemische Laboranalysen von Gesteinsproben und Bohrkernen dieser und weiterer SEE-Lagerstätten, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu testen. Abb. 1 zeigt Gesteinsproben aus Storkwitz, welche mit dem REEMAP-Laboranalysemodul analysiert wurden. Hierbei ist die Anreicherung von Neodym über seine charakteristischen, spektralen Absorptionserkmale im nahen Infrarot dargestellt (B). Im rechten Bild (D) ist die Mineralverteilung auf der Probenoberfläche dargestellt, die mit dem mineralogischen Analysemodul aus REEMAP klassifiziert wurde.

Neben den REEMAP-Laborverfahren, z. B. für Bohrkern, Dünnschliffe und Gesteinsproben, wurden im feldbasierten Teil auch Methoden entwickelt, die eine



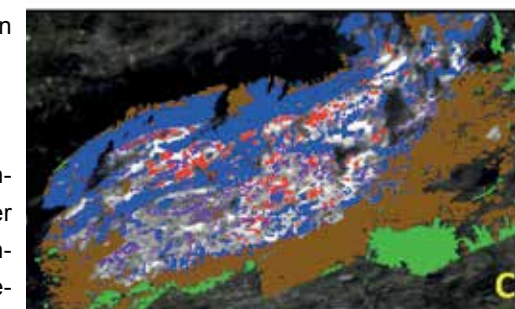
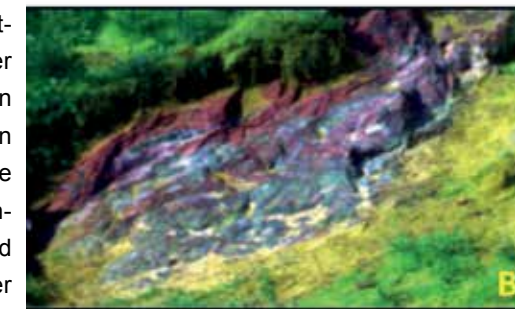
Charakterisierung der SEE und Ihrer Mineralogie direkt am Aufschluss ermöglichen. Abb. 2 zeigt die Anreicherung des SEE-führenden Minerals Eudialyt eines Aufschlusses (Abb. 2C) in Norra Kärr, Schweden.

Die die Hyperspektralaufnahmen begleitenden, petrologischen und geochemischen Arbeiten belegen deutlich die hohe Transportfähigkeit der Selten Erden vom Gestein über den Boden in die lokale Flora. Somit konnten neben den Unterböden als potenzielle SEE-Ressourcen insbesondere Brennnesseln, Farne, Schachtelhalme und Eichen als biogene Seltenerdträger identifiziert werden. Sie könnten dadurch zukünftig in der Seltenerd-Prospektion an Bedeutung gewinnen.

Ausblick

Weitere Tests an anderen Lagerstätten-typen zeigten den großen Nutzen der Feldmethoden u.a. in der Naturstein-industrie (Larvik) sowie im Kupfertagebau (Zypern).

Unabhängig von unterschiedlichen Sensoren und Anwendungen wurden die Ergebnisse in eine Software umgesetzt und bilden einen bedeutenden Teil der ReSens+ Technologietransferaktivitäten, die auf eine starke Resonanz der Industrie stoßen und in einer Ausgründung mündeten.



Falschfarbendarstellung – RGB: 2.17µm, 0.88µm, 0.47µm

Blaugrün: Eudialyt
Rot: Nephelin-Syenit,
Braun: Boden
Grün: Vegetation

Einheiten:
■ Nephelin-Syenit
■ Eudialyt-Nd
■ Muskovit
■ Boden
■ Vegetation

Abb. 2: Scan und Analyse eines Nephelin-Syenits bei Norra Kärr, Schweden. A: RGB-Farbdarstellung, B: Zoom des Gesteinsaufschlusses in Falschfarben (2.17µm, 0.88µm, 0.47µm), C: Klassifizierungsergebnis mit der Nd-Verteilung in rot, Quelle: Dr. Martin Schodlok, BGR

Kontakt

Helmholtz Zentrum Potsdam
Deutsches Geoforschungszentrum GFZ
Telegrafenberg
14473 Potsdam
Dr. Christian Mielke | Tel. +49 331 288 1820
E-Mail: chmielke@gfz-potsdam.de
Projektlaufzeit: 01.06.2016 – 31.12.2018
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 114

ResErVar

Ressourcenpotenzial hydrothermaler Lagerstätten der Varisziden

Geopotenzial wirtschaftsstrategischer Metalle in Deutschland neu betrachtet

Wegen des fehlenden wirtschaftlichen Interesses wurde in den vergangenen 30 Jahren das Ressourcenpotenzial für wirtschaftskritische Rohstoffe wie Kobalt, Lithium, Indium, Germanium, Zinn, Wolfram und Seltene Erden in Deutschland weder systematisch erfasst noch kritisch bewertet. So fehlen eine moderne Datengrundlage und das vertiefte Verständnis zur Genese bekannter Erzlagerstätten. De facto wissen wir nur sehr wenig über das wahre Ressourcenpotenzial in Deutschland. Dieses fehlende Wissen stellt aktuell ein erhebliches Hemmnis für moderne Erkundung dar.

Die Datengrundlage und das Verständnis für heimische Erzlagerstätten zu verbessern war die Motivation für das ResErVar-Forschungsnetzwerk, bestehend aus Teilnehmern der Universitäten in Aachen, Clausthal, Freiberg und Tübingen – koordiniert vom Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie. Gemeinsam haben die Forscher die Prozesse der Lagerstättenbildung und -erhaltung im variszischen Grundgebirge untersucht.

Ergebnisse

Das Umfeld bekannter Lagerstädtendistrikte im Erzgebirge, Harz, Schwarzwald und dem Siegerland wurde unter die Lupe genommen. Es wurde eine umfangreiche neue Datenbasis geschaffen und daraus abgeleitet neues Prozessverständnis gewonnen. Das neuartige Verständnis ist im Jahr 2017 auf der internationalen Goldschmidt-Tagung in Paris vorgestellt und Anfang 2019 als Themenband mit dem Titel „Ore Deposits in the Variscan Basement of Central Europe“ in einem international führenden Journal (Mineralium Deposita) veröffentlicht worden.

In allen vier Regionen wurden wichtige und neuartige Erkenntnisse gewonnen. Im Harz fanden Wissenschaftler der TU Clausthal geochemische Hinweise darauf, dass die Quelle für die in den Ganglagerstätten konzentrierten Metalle im prä-variszischen Basement liegen muss. Die Daten deuten insbesondere auf ein großflächiges, homogenes Hy-



Abb. 1: Schematische Karte der Bundesrepublik Deutschland. Schraffiert sind Bereiche des variszischen Grundgebirges, die heute an der Erdoberfläche aufgeschlossen sind und deren Rohstoffpotenzial recht gut bekannt ist. In blauer Farbe gehalten sind daran angrenzende Grundgebirgseinheiten unter flacher Überdeckung durch jüngere Gesteinseinheiten. Diesen Bereichen wird besonders hohes Explorationspotenzial zugewiesen. Quelle: HZDR

drothermalsystem im Oberharz hin. Weiterhin wurde eine ungewöhnliche Karbonat-assoziierte Mineralisation von Seltenen Erden in der Ganglagerstätte Bad Grund erstmals im Detail untersucht.

Auch im Siegerland wurden Hinweise darauf gefunden, dass sich die Metallquelle für die dort abgebauten polymetallischen Gangerze in tieferliegenden, metasedimentären Einheiten des Basements befinden muss. Die Mobilisation der Metalle erfolgte durch metamorphe Fluide, die im Zuge der variszischen Gebirgsbildung entlang der Siegener Haupt-Aufschiebung aufgestiegen sind.



Abb. 2a und b: Untertage-Befahrung des Skarn-Vorkommens Hämmerlein im Erzgebirge während des dritten ResErVar-Netzwerktreffens im Jahr 2016. Vor Ort untersuchen die Wissenschaftler die Beschaffenheit sowie die Entstehung der Erze, die reich an wirtschaftskritischen Metallen wie Zinn und Indium sind. Fotos: HZDR

Wirtschaftlich relevante Erzlagerstätten im Erzgebirge sind an post-variszische und primär magmatisch-hydrothermale Prozesse gebunden. Neueste Erkenntnisse deuten darauf, dass Skarne (ca. 310–295 Ma) und Greisen (326–320 Ma) nicht dem gleichen post-variszischen Mineralisationseignis angehören und somit Sn-W-Zn-In Mineralisation in Skarnen scheinbar in keiner zeitlichen Beziehung zu großen bekannten Granitintrusionen steht. Die Quelle der erzbildenden Fluide ist noch unbekannt. Daher müssen alle metakarbonatführenden Horizonte im Erzgebirge zunächst als prospektiv angesehen werden.

In der Grube Clara im Mittleren Schwarzwald konnten die Wissenschaftler die Erhaltung der primären, hydrothermalen vertikalen Silberzonierung trotz mehrfacher Überprägung und Umverteilung dokumentieren. Die Silbergehalte im Hydrothermalsystem nehmen dabei mit der Tiefe zu. Es wird angenommen, dass diese Vertikalzonierung im gesamten Schwarzwald vorhanden ist. Es wird daher Ressourcenpotenzial für Ag-Mineralisation in der Tiefe im Mittleren und im Nordschwarzwald vermutet.

Ausblick

Die Ergebnisse aus dem ResErVar-Projekt haben erhebliche Bedeutung für die Bewertung des Ressourcenpotenzials des variszischen Grundgebirges in Deutschland. Die Studien, die in verschiedenen Teilen des Grundgebirges erfolgten, weisen sehr hohes Potenzial im Liegenden der bisher bekannten Lagerstätten aus (Abb. 1). Dieses Potenzial sollte durch zukünftige Tiefbohrungen erkundet werden. Ähnlich ist es in Bezug auf die laterale Begrenzung der bisher

bekannten Lagerstädtendistrikte. Hier werden insbesondere solche Bereiche als prospektiv angesehen, in denen Grundgebirgseinheiten unter weniger als 500 m Überdeckung anstehen. Moderne geophysikalische Methoden können größere Erzlagerstätten in diesen Tiefen identifizieren.

Vertiefte Kompetenzen vermittelt

Das ResErVar-Konsortium war ähnlich einer Graduiertenschule für junge Wissenschaftler organisiert. Um den Teilnehmern vertiefte Kompetenzen hinsichtlich der Erzlagerstätten der Varisziden zu vermitteln, wurden im Rahmen des ResErVar-Projektes jeweils vier Geländeschulen und Kurzlehrgänge angeboten (Abb. 2). An diesen haben auch junge Forscher aus den r⁴-Verbundforschungsprojekten AFK, DESMEX, GRAMM, HTMET und WISTAMERZ teilgenommen. Die gemeinsamen Veranstaltungen führten zu einer engen und vertrauensvollen Zusammenarbeit über die Grenzen der Einzelprojekte hinweg.

Kontakt

Helmholtz-Zentrum Dresden – Rossendorf
Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie
Chemnitz Str. 40
09599 Freiberg
Prof. Dr. Jens Gutzmer | Tel. +49 351 260 4400
E-Mail: j.gutzmer@hzdr.de
Projektlaufzeit: 01.06.2015 – 31.12.2018
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 114

WISTAMERZ

Prognose wirtschaftsstrategischer Hochtechnologiemetalle am Beispiel des Erzgebirges

Geochemisches Grundlagenwissen erweitert

Am Beispiel der Region Erzgebirge/Vogtland entwickelte WISTAMERZ fortschrittliche Methoden zur Vorhersage des Potenzials für seltene und hochtechnologische Metalle, wie Ga, Ge, In, Li, Sb, Se, Sn, Ta, Te und W in großen Territorien. Aufbauend auf vorhandenem Wissen, kombiniert mit einer neuen flächendeckenden Bachsedimentgeochemie und der gezielten Untersuchung von Vererzungen, wurden neue metallogenetische Modelle abgeleitet. Diese dienen als Grundlage für die Entwicklung von Höffigkeitskarten mittels Verfahren der künstlichen Intelligenz. Die Erkenntnisse sind in einem geochemischen Atlas und in einer neuen metallogenetischen Karte zusammengefasst und veröffentlicht worden. Diese sind unter www.wistamerz.de allgemein verfügbar.

Ergebnisse

Der neue geochemische Atlas für das 5000 km² umfassende Projektgebiet beinhaltet geochemische Karten für 40 Elemente des Periodensystems. Auf diesen Karten werden als neues geowissenschaftliches Grundlagenwissen die räumliche Verteilung des jeweiligen chemischen Elements, wichtige statistische Maßzahlen sowie ergänzende geologische und rohstoffgeologische Informationen dargestellt. Die rohstoffgeologischen Fakten und metallogenetischen Zusammenhänge wurden zusammenfassend dargestellt und veröffentlicht.

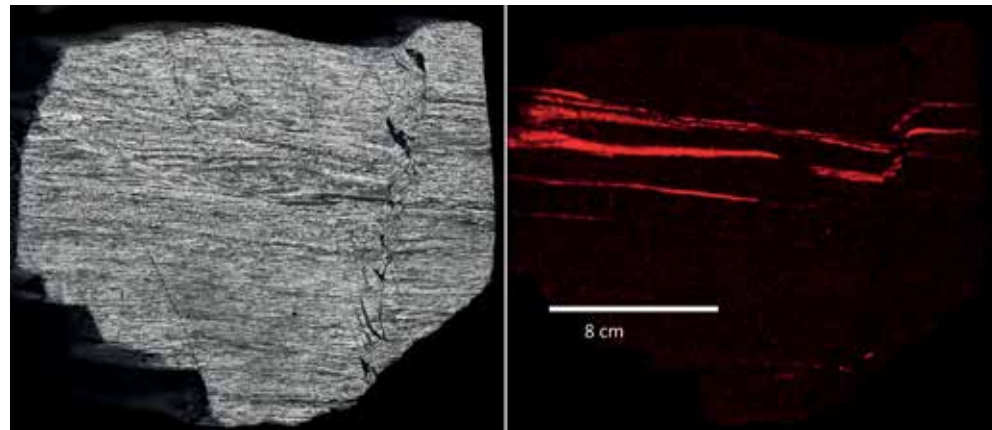


Abb. 1: Kassiterit in Biotitlagen in metamorphisierten Metasedimenten, Quelle: Tornadoscan, BGR, C. Legler

Durch die gezielte Untersuchung von Mineralisationen, die Auswertung umfangreicher Literatur und die Einbeziehung von Altdatenbeständen konnten neue metallogenetische Modelle entwickelt werden. Diese ordnen die Vielfalt der im Erzgebirge bekannten Mineralisationen in eine schrittweise aufeinander aufbauende Kette lagerstättenbildender Prozesse ein, welche über einen Zeitraum von mindestens 470 Millionen Jahren letztendlich zu der großen Vielfalt der heute beobachteten Lagerstättentypen führte.

Die großflächige Bildung von Metallanreicherungen in den marinen Sedimenten des unteren Paläozoikums (470 – 360 Mio Jahre) wird als prinzipielle Voraussetzung für die metallogenetische Prägung des gesamten Erzgebirges angesehen. Ursache dafür ist wahrscheinlich eine günstige Kombination von tektonischen, vulkanischen und sedimentären Ereignissen. Während der späteren variszischen Gebirgsbildung (340 – 280 Mio Jahre) wurden diese Metallanreicherungen überprägt, teilweise umgelagert und vor allem durch das Eindringen von Graniten beeinflusst. Es bildete sich eine Vielzahl der allgemein bekannten Erzgänge (u. a. mit Zinn und Silber), welche über Jahrhunderte Gegenstand des Erzbergbaus waren. In der nachfolgenden langen Zeit der Inaktivität (260 – 70 Mio. Jahre) wurde das Gebirge eingeebnet und es bildeten sich eher geringfügige Metallanreicherungen in Fluss- und Meeresablagerungen.

In der folgenden Periode der tektonischen Reaktivierung und Heraushebung des Erzgebirges (70 Mio Jahre – heute) führte ein daran gebundener erhöhter Wärmestrom zu Aktivierung hydrothermaler Tätigkeit und der Bildung zahlreicher Lagerstätten von Uran, anderen Metallen sowie Fluss- und Schwespat aus bereits präexistente Metallanreicherungen.

Suche und Erkundung von Primärrohstoffen | WISTAMERZ

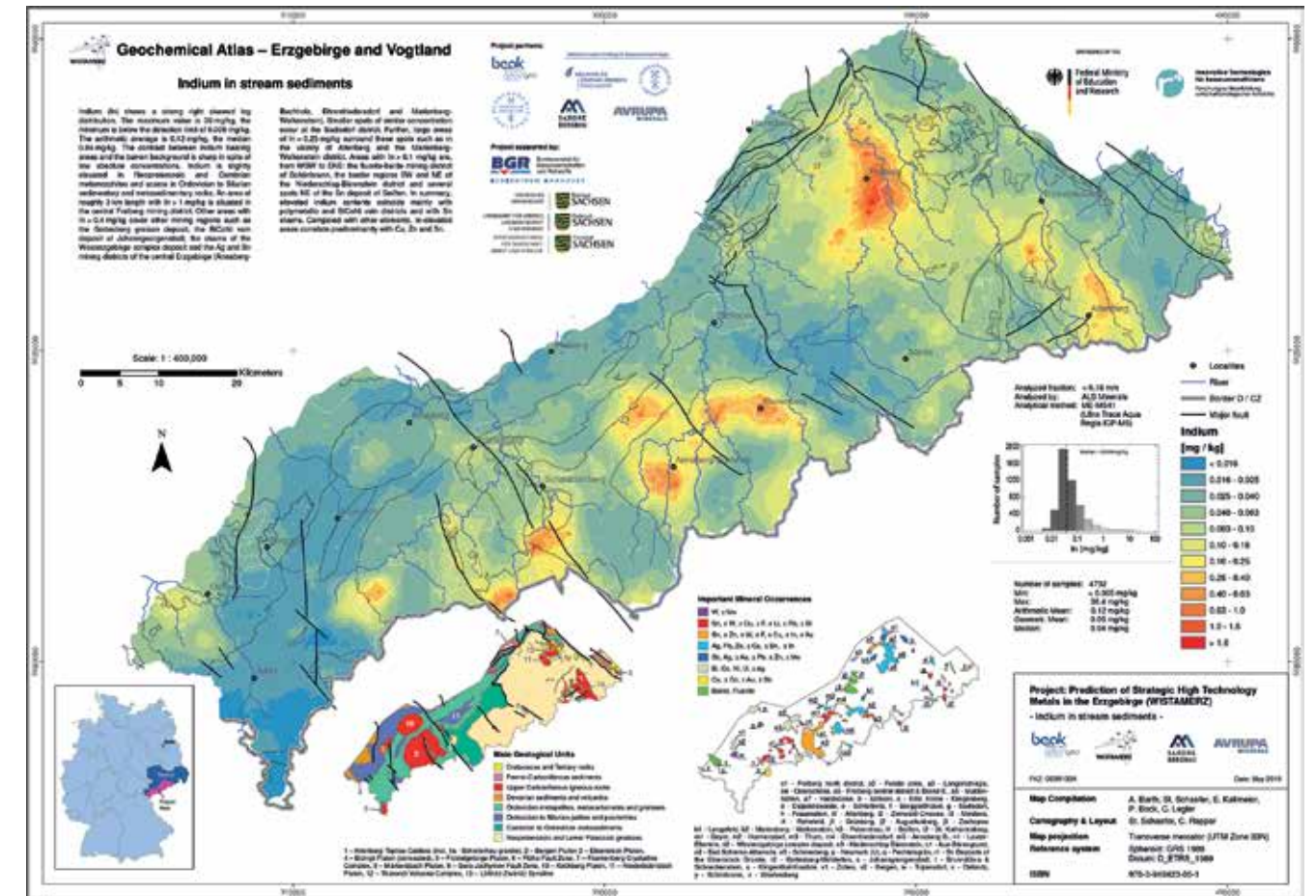


Abb. 2: Geochemische Karte des Elements Indium, Quelle: A. Barth, u. a.

Unter Verwendung einer Kombination aus wissenschaftsbasierten (Explorationsmodelle) und datengetriebenen Methoden (künstliche neuronale Netze) wurden mit Hilfe der advangeo® Prediction Software Potenzialkarten für die Rohstoffe Zinn und Flussspat berechnet. Die Ergebniskarten sind in der metallogenetischen Karte des Erzgebirges/Vogtlandes enthalten.

Ausblick

Die Ergebnisse des Projektes WISTAMERZ bilden sowohl die Grundlage für zukünftige Prospektions- und Explorationsarbeiten als auch für weitergehende wissenschaftliche Untersuchungen.

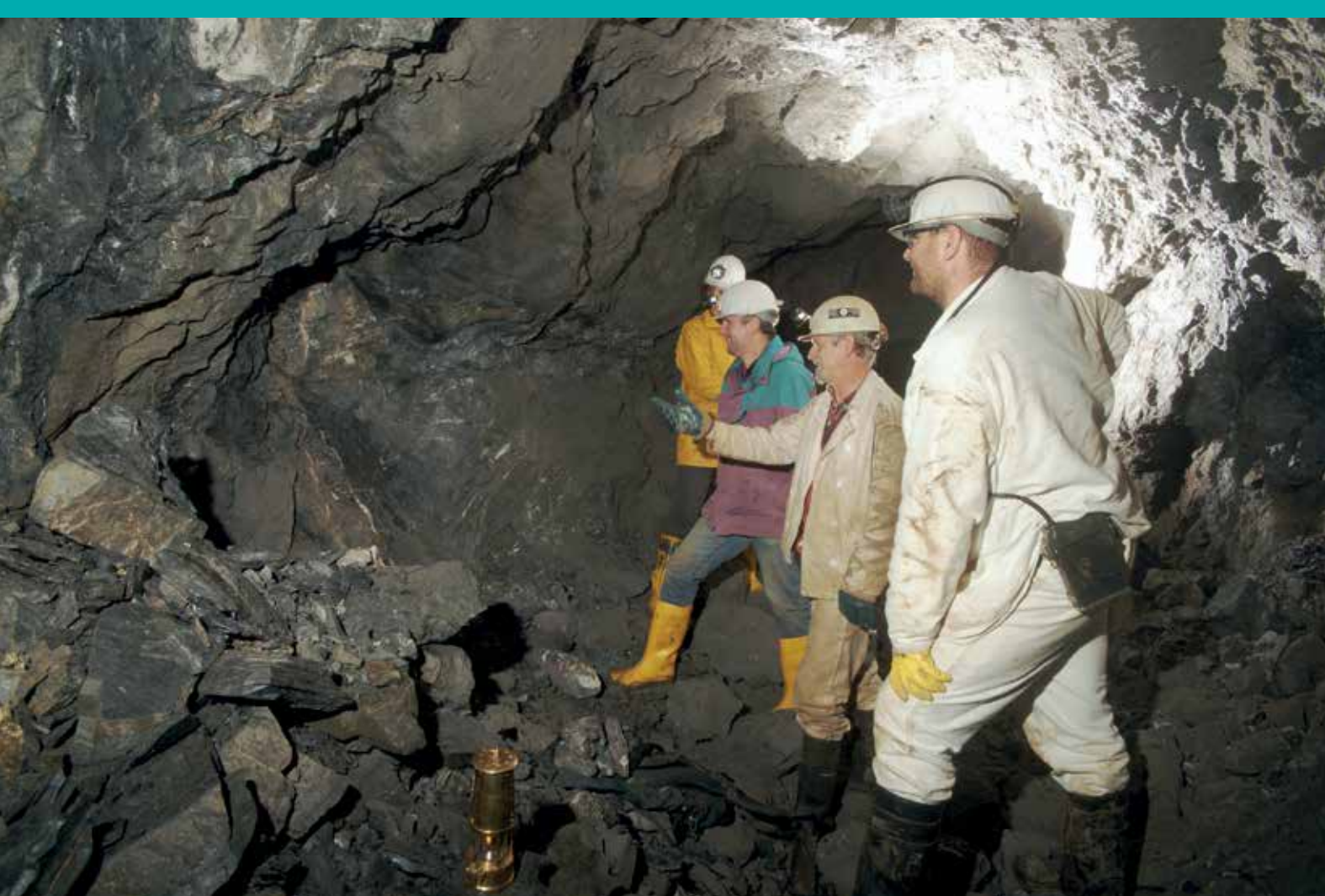
Perspektiven für die Lokalisierung neuer Lagerstätten bestehen insbesondere innerhalb geochemischer Anomalien der Elemente Au, Sb, Bi, Cu, In, Li, Sn, W sowie in unterpaläozoischen Gesteinen, insbesondere über verdeckten Granitintrusiven.

Die Ergebnisse des Projektes WISTAMERZ eröffnen Perspektiven für die Exploration von Zinn und Polymetallen in Gebieten mit ähnlichem geologischem Bau.

Wir danken dem LfULG Sachsen, der WISMUT GmbH sowie zahlreichen Privatpersonen für die Bereitstellung von Probenmaterial, Daten und Archivunterlagen.

Kontakt

Beak Consultants GmbH
Am St. Niclas Schacht 13
09599 Freiberg
Dr. Andreas Barth | Tel. +49 3731-781350
E-Mail: andreas.barth@beak.de
Projektlaufzeit: 01.06.2015 – 31.12.2018
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 119



r⁴-Verbundprojekte

Gewinnung und Aufbereitung von Primärrohstoffen

- ▶ AFK
- ▶ ELIZE
- ▶ OptiWiM
- ▶ SEEsand
- ▶ SE-FLECX
- ▶ SEM²
- ▶ UPNS4D+



AFK

Aufbereitung feinkörniger heimischer polymetallischer In/W/Sn-Komplexerzlagerstätten

Komplexerze lassen sich aufbereiten

Europäische Rohstoffexperten haben erstmalig gezeigt: komplex zusammengesetzte Erze aus Sachsen lassen sich aufbereiten – und zwar energieeffizient, umweltschonend und wirtschaftlich. Dank moderner Rohstoffanalysen und dem Einsatz computergestützter Prozessmodelle konnte unter anderem ein marktfähiges Zinnmineralkonzentrat angereichert werden.

Gemeinsam erreichten die Spezialisten des vom BMBF geförderten r⁴-Projekts AFK und des europäischen Horizon2020-Projekts „Flexible and Mobile Economic Processing Technologies (FAME)“ das gesteckte Ziel. Besonders die enge Kooperation mit den lokalen Industriepartnern Saxore Bergbau GmbH und der UVR-FIA GmbH machten die Praxistests erst möglich, aber auch die Zusammenarbeit mit dem Besucherbergwerk Zinnkammern Pöhla e.V., wo das Komplexerz abgebaut wurde.

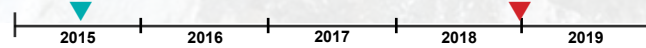
Damit könnte eine lange Tradition im Erzgebirge wieder aufleben – der Erzbergbau. Es geht um Zinn, Zink oder auch Indium, die extrem fein in den heimischen Komplexerzen verteilt sind und deshalb nur schwer angereichert werden können.

Ergebnisse

In den letzten dreieinhalb Jahren ist das Unmögliche geschafft und am Freiburger Standort ein neues Verfahren entwickelt worden, mit dem die Minerale, in denen die Metalle stecken, aus komplexen Erzen gewonnen werden können. Dass dies



Abb. 1: Abbau der Großprobe in der Lagerstätte Hämmerlein-Tellerhäuser für den finalen Pilotversuch, Erzgebirge, Foto: HZDR



nicht nur im Reagenzglas klappt, wurde in einem Pilotversuch mit knapp 140 Tonnen erzhaltigem Gestein unter Beweis gestellt. Mikroanalytische Vorabuntersuchungen gaben wichtige Hinweise zur Wahl einer geeigneten Aufbereitungsstrategie.

Etwa 104.000 Tonnen Zinn stecken in der gesamten Lagerstätte Hämmerlein-Tellerhäuser, genauer gesagt im Zinnoxid Kassiterit. Daneben gibt es etwa 111.000 Tonnen Zink und 907 Tonnen Indium in verschiedenen Sulfidmineralen. Zudem ist das Gestein reich an eisenreichen Mineralen. Mit den Kenntnissen der geologischen Analyse und Ergebnissen aus parallel laufenden Aufbereitungstests, modellierten Mathematiker am Computer in tausenden von Rechenschritten verschiedene Trennszenarien. Anschließend ermittelten sie, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Mineral angereichert wird und welche Prozessbedingungen dafür nötig sind. Auf diese Weise gelang es, eine mehrstufige Prozesskette virtuell nachzustellen und die besten Versuchsparameter für den Pilottest zu ermitteln.

Dieser startete mit zwei Sortierversuchen. Das Ziel: mehrere Tonnen des wertarmen Gesteins noch vor der eigentlichen Aufbereitung abzutrennen. Das spart Energie und minimiert erheblich den Einsatz von Wasser und Prozesschemikalien aber auch den Abraum. Ingenieure testeten das Bruchverhalten des Materials, indem sie große Gesteinsbrocken einem hohen punktuellen Druck aussetzten. Aufgrund der unterschiedlich spröden Minerale kann man das Gestein in erzarme und erzreiche Bruchstücke trennen. Durchleuchtet mit Röntgenstrahlen, lässt es sich zudem anhand seiner atomaren Dichte unterscheiden. Erzarmes Gestein ist weniger dicht. Im Pilotversuch konnten so rund 30 Tonnen der Probe aussortiert werden.

Ist das erzreiche Gestein danach gemahlen, ziehen starke Magnete die eisenreichen Minerale aus dem Gemisch, die sonst die weitere Verarbeitung stören. Als nächstes wird das nichtmagnetische Material flотиert. Dieses Verfahren trennt die Sulfide aus dem Gemisch. Dafür wird Material in wassergefüllte Flotationskammern geleitet. Hinzu kommen Chemikalien und Luftblasen. Die Chemikalien bauen eine Art Brücke zwischen den Sulfiden und Luftblasen. So erhalten die Sulfide Auftrieb



Abb. 2: Mit dem Backenbrecher werden die Gesteinsbrocken in faustgroße Stücke zerkleinert, um später mithilfe von Röntgenstrahlen in erzreiche und erzarme Gesteine vorsortiert zu werden, Fotos: UVR-FIA GmbH

und landen mit den Chemikalien an der Oberfläche, wo sie als Schaum abgetrennt werden. Die verschiedenen Sulfidminerale werden anschließend weiter voneinander getrennt.



Abb. 3: Probenahme am Rütteltisch, um den Gehalt des zinnhaltigen Minerals Kassiterit festzustellen, Foto: HZDR, D. Müller

Was nun folgt, ist der sogenannte Rütteltisch. Beginnt der Tisch zu schwingen, setzt sich in dem verbleibenden Massenstrom das schwerere Mineral Kassiterit in Rinnen ab und wird über Rillen an das Ende des Tisches transportiert, während leichte Mineralkörner von einem Wasserstrom weggespült werden.

Bis zu 40 % des Kassiterits wurden allein bei diesem Schritt angereichert.

Ausblick

Weitergehende Aufbereitungsversuche im Labormaßstab konnten sogar bis zu 60 % des Kassiterits anreichern sowie bis zu 70 % der Zinksulfide. Was nun folgt, sind weitere Ergebnisanalysen für Metalle wie Indium oder Kupfer sowie eine umfassende Machbarkeitsstudie und die Planung eines Bergwerks durch die Saxore GmbH.

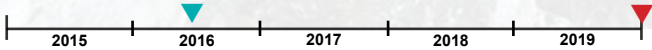
Kontakt

Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie
Chemnitz Str. 40
09599 Freiberg
Prof. K. Gerald van den Boogaart | Tel. +49 351 260 4409
E-Mail: boogaart@hzdr.de
Projektlaufzeit: 01.06.2015 – 31.12.2018
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 104



ELIZE

Elektroimpulszerkleinerung in großtechnischen Zerkleinerungsmaschinen zur Aufbereitung komplexer Erze



Hochspannungsimpulse für die Aufbereitung komplexer Erze

Komplexerzlagertstätten der Erzgebirgsregion enthalten eine Reihe wirtschaftsstrategischer Hochtechnologiemetalle und Seltene Erden. Aufgrund ihrer polymetallisch komplexen mineralogischen Gefüge und den daraus resultierenden Eigenschaften, wie hoher Zähigkeit, wurden der Abbau und die Aufbereitung dieser Erze bisher als unwirtschaftlich betrachtet.

Das ELIZE-Projekt setzt auf die Anwendung innovativer Elektroimpulstechnologie und entwickelte eine Pilotanlage zur Aufbereitung komplexer Erze. Um mittels hochenergetischer Elektroimpulse die Komplexerzgefüge zu schwächen beziehungsweise so zu schädigen, dass die nachfolgende Aufbereitung wirtschaftlicher und energieeffizienter wird.

Der erste Schritt innerhalb des ELIZE-Projekts war die Auswahl von relevanten Erzen aus der Erzgebirgsregion: Scheelitskarn aus Antonsthal, Granatskarn aus Pöhla und Greisenerz aus Sadisdorf. Es folgte eine ausführliche Charakterisierung der mechanischen und mikrostrukturellen Eigenschaften dieser Erze.

Hinsichtlich einer Anwendung der innovativen EIZ-Technologie sind die Erzeugung und Ausbreitung von Rissen nach der nach der Elektroimpulsbehandlung von besonderem Interesse. Entsprechende Versuche erfolgten auch an Eibenstock Granit.

Zur Erzeugung der Impulse wurde ein spezieller Marx-Generator entwickelt. Dieser hat 15 Stufen und eine maximale Ausgangsspannung von 600 kV. Die typische Energie für einen Einzelimpuls beträgt etwa 350 J.

	Skamerz	Granatskarn	Greisenerz	Eibenstock Granit
Original				
Nach Elektroimpuls-Tests				
Makroskopische Analyse nach Elektroimpuls-Tests				

Abb. 1: Erzproben vor und nach der Behandlung mit Elektroimpulsen. Oberste Reihe: Materialien in ihrem Originalzustand, mittlere Reihe: Proben nach Elektroimpulstests (Skamerz, Granatskarn und Greisen: Einzelimpulstests; Eibenstock Granit: 10-Impulse Test) und untere Reihe: makroskopische Analyse im Stereoskop, Fotos: Mezzetti, TUBAF-IAM

Ergebnisse

Bei den Versuchen standen folgende Fragen im Vordergrund: Wo entstehen die Risse? Wie erfolgt die Rissausbreitung – zwischen oder durch bestimmte mineralische Phasen? Ergebnisse der Einzelimpulstests an Erzproben sind in Abbildung 1 zusammengefasst dargestellt. Es war möglich, Erzstücke mit nur einem Einzelimpuls komplett zu zerstören.

Untersuchungen zum Thema Rissausbreitung mittels Elektroimpulsen haben gezeigt, dass die Rissausbreitung teilweise entlang der Korngrenzen stattfindet und teilweise durch bestimmte Phasen. Bei einigen Erzen, wie Granatskarn, wurde eine deutliche Verbreitung der Risse entlang der Korngrenzen nachgewiesen (Abb. 2). Weitere Untersuchungen zur Evaluation der Zusammenhänge zwischen Gefüge und Prozessparameter sind nötig.

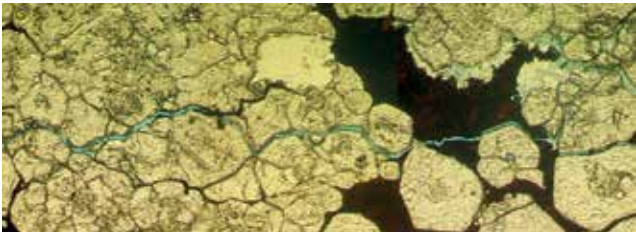


Abb. 2: Beispiel der Rissausbreitungsanalyse in Granatskarn, Bild: Popov, TUBAF-IAM

Durch die Elektroimpulse wurden erfolgreich Risse in den Erzproben erzeugt. Diese Schädigung kann zu einer Reduzierung der benötigten Gesamtenergie für den Aufbereitungsprozess genutzt werden.



Abb. 3: ELIZE-A-Versuchsstand, Foto: M. Mezzetti, TUBAF-IAM

Der Versuchsstand für die Aufbereitung größerer Erzmengen mittels Elektroimpuls-Zerkleinerung (EIZ) wurde am Institut für Aufbereitungsmaschinen (IAM-TUBAF) aufgebaut. Dieser Versuchsstand (Abb. 3) stellte den ersten Meilenstein im Projekt dar.

Mit Hilfe des ELIZE-Versuchsstands am IAM wurden die Prozessparameter evaluiert. So gewonnene Erkenntnisse

flossen direkt in die Entwicklung der Pilotanlage für einen kontinuierlichen Betrieb ein. Die ELIZE-B-Pilotanlage (Abb. 4) ermöglicht die kontinuierliche Behandlung von Komplexerzen mit einem Durchsatz von bis zu 500 kg/h.

Ausblick

Die Elektroimpulsbeanspruchung wird nicht als Ersatz für bestehende Aufbereitungstechnologien betrachtet, sondern als eine Ergänzung zu bereits vorhandenen Methoden. Sie eröffnet die Möglichkeit, eine gezielte Schwächung des Gefüges, vorzugsweise entlang von Korngrenzen, zu erzeugen. Die entstandenen Risse oder Anrisse im Gefüge reduzieren den Energieaufwand für die anschließende weitere Aufbereitung.



Abb. 4: ELIZE-B-Pilotanlage, Foto: M. Mezzetti, TUBAF-IAM

Der nächste Schritt in der Entwicklung der Elektroimpulstechnologie ist eine kontinuierlich arbeitende Maschine mit einem Durchsatz von mehreren Tonnen pro Stunde, zur Übertragung der Technologie in den industriellen Maßstab.

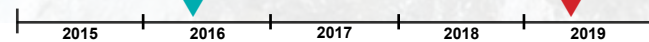
Kontakt

TU Bergakademie Freiberg,
Institut für Aufbereitungsmaschinen
Lampadiusstraße 4
09599 Freiberg
Prof. Dr. Holger Lieberwirth | Tel. +49 3731 39-2558
E-Mail: Holger.Lieberwirth@iam.tu-freiberg.de
Projektlaufzeit: 01.07.2016 – 31.12.2019
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 108



OptiWiM

Optimierung der Wertschöpfungskette für polymineralische Erze wirtschaftsstrategischer Metalle



Polyminerale Erze tragen weltweit zu den Ressourcen an Hochtechnologiemetallen – wie Niob, Zirkonium oder Seltenen Erden – bei. Diese vielfach an granitoiden Gesteine gebundenen Rohstoffvorkommen sind zwar aufgrund ihres vielfältigen Angebotspektrums wirtschaftlich robuster, besitzen derzeit jedoch noch den technologischen und wirtschaftlichen Nachteil einer vergleichsweise aufwändigen Gewinnung. Zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe rücken die-

se bislang weniger beachteten Ressourcen nun verstärkt in den Fokus.

Ergebnisse

Im Rahmen des Projekts OptiWiM wurde die Lagerstätte Khalzan Buregtei (Mongolei) als idealtypisches Beispiel für polyminerale granitgebundene Hochtechnologiemetallvorkommen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass postmagmatische Prozesse einen wesentlichen Einfluss auf

die polyminerale Elementführung und textuelle Komplexität haben. Einzelne Prozessketten, die in anderen Lagerstätten erfolgreich zur Aufbereitung eingesetzt werden, erlauben hier daher nur einen Bruchteil des polymineralischen Inventars bei relativ hohem Einsatz von Energie und Material zu extrahieren. An diesem Punkt setzte das Projekt OptiWiM an, um durch innovative Ansätze die Gewinnung aller Erzmineralphasen und damit eine wirtschaftliche Nutzung dieser und anderer polymineralischer Lagerstätten dieses Typs zu ermöglichen.

Effizienz durch Vorsortierung

Ein Ergebnis der mineralogischen Untersuchungen ist, dass die postmagmatischen Erzmineralneubildungen entlang von Korngrenzen magmatischer Minerale kristallisierten oder magmatische Phasen unter Erhaltung der ursprünglichen Mineralform ersetzten. So treten auch die postmagmatischen Erzminerale in räumlich verteilten relativ grobkörnigen Aggregaten in den Größendimensionen des magmatischen Ausgangsgesteins auf. Die daraus resultierende im Millimeter-Maßstab variierende Verteilung der Erzminerale, bzw. Bildung von Erzmineral-Aggregaten, erlaubt die Anwendung einer effizienten sensorgestützten Vorsortierung. Die Vor-

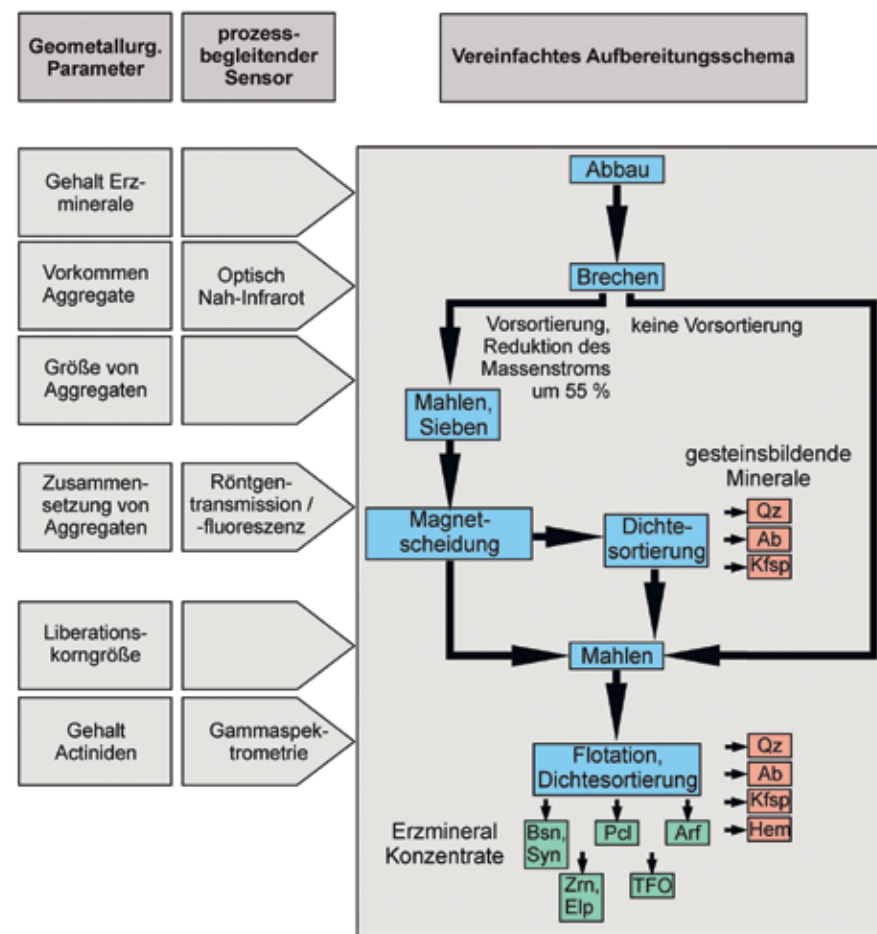


Abb. 1: Vereinfachtes exemplarisches Aufbereitungsschema zur effizienten Konzentration aller Trägerminerale von Hochtechnologiemetallen unter Anwendung einer Vorkonzentration. Die Kenntnis der im Projekt OptiWiM erarbeiteten geometallurgischen Parameter lässt sich auf unterschiedlichen Ebenen zur Steuerung und Optimierung des Gewinnungsprozesses nutzen. Dabei kommen verschiedene Sensoren zur Echtzeitcharakterisierung des Materialstroms zum Einsatz, Ab = Albit, Arf = Arfvedsonit, Bsn = Bastnäsit, Elp = Elpidit, Hem = Hämatit, Kfsp = Kalifeldspat, Pcl = Pyrochlor, Qz = Quarz, Syn = Synchysit, TFO = Titan-Eisen-Oxide, Zm = Zirkon, Quelle: LuF Aufbereitung mineralischer Rohstoffe, RWTH Aachen



sortierung und Anreicherung von Erzmineral-Aggregaten kann mittels Magnet- und Dichtescheidung in einer Kornfraktion erfolgen, die weit oberhalb der Libationskorngröße der einzelnen Erzmineralphasen ist (Abb. 1). Damit verläuft der Aufbereitungsprozess bei deutlich reduziertem Energie- und Materialaufwand.

Großprobenversuche haben gezeigt, dass eine Vorsortierung in eine grobe Fraktion eine signifikante Reduktion des Massenstroms um 55 % sowie des Energieaufwands um bis zu 41 % erlaubt, was einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit des Prozesses darstellt.

Die nachgeschaltete Konzentration der mineralischen Wertstoffe kann effizient unter Berücksichtigung aller Erzmineralphasen in dem Vorkonzentrat erfolgen. So konnte die Anreicherung des wichtigsten Trägers der schweren Seltenen Erden und des Zirkoniums, des Erzminerals Zirkon, im Konzentrat um den Faktor 2.5 gegenüber herkömmlichen Aufbereitungsprozessen erhöht werden.

Es wird deutlich, dass es für eine effiziente und ökonomisch wie auch ökologisch verbesserte Nutzung der Lagerstätte neben dem absoluten Gehalt der Erzminerale vielmehr auf die Berücksichtigung der prozessrelevanten mineralogischen und textuellen Parameter ankommt. Der Einfluss dieser geometallurgischen Parameter auf den Aufbereitungsprozess und somit auch auf Kosten und Ertrag der gesamten Wertschöpfungskette wird in Abb. 1 gezeigt.

Aufbauend auf der in OptiWiM erstellten und damit erstmalig vorliegenden Kombination aller Daten aus verschiedenen Explorationskampagnen und ihrer Implementation in ein 3D-Modell wird gezeigt, dass das Vorkommen von Khalzan Buregtei durch eine stark heterogene Verteilung der Hochtechnologiemetalle Zirkonium, Seltene Erden und Niob gekennzeichnet ist.

Unter Berücksichtigung der Erzmineralogie lassen sich verschiedene geometallurgische Domänen unterscheiden (Abb. 2). Alle Domänen erlauben eine Vorsortierung. Die markanten Unterschiede in der Erzmineralverteilung lassen jedoch deutliche Unterschiede in den zu erwartenden Konzentraten prognostizieren.

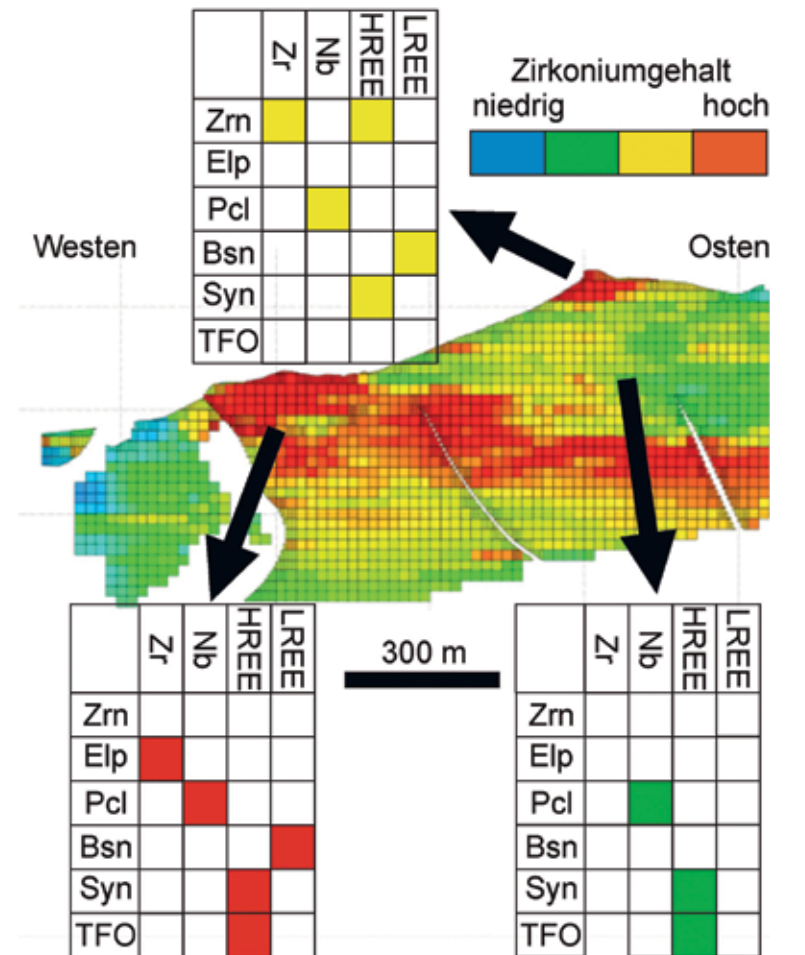


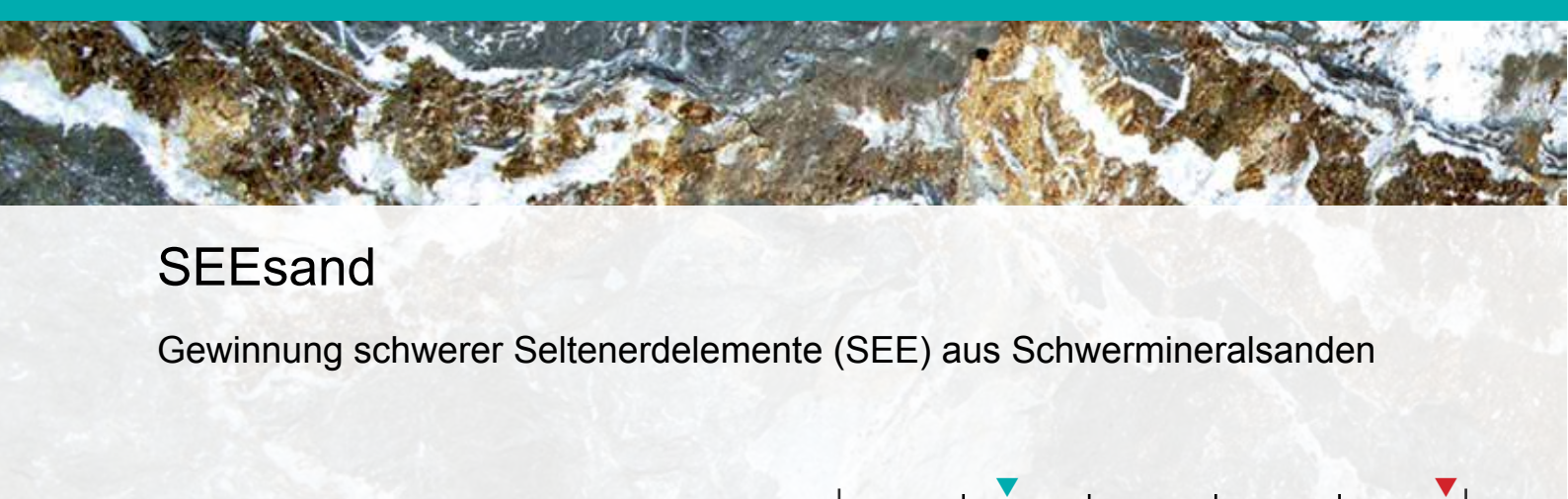
Abb. 2: Profilschnitt durch den südlichen Lagerstättenteil von Khalzan Buregtei, Aufteilung in geometallurgische Domänen in Abhängigkeit der Elementführung und Erzmineralogie, Abkürzungen wie in Abb. 1, Quelle: Institut für Angewandte Mineralogie und Lagerstättenlehre, RWTH Aachen

Ausblick

Die in OptiWiM am Beispiel Khalzan Buregtei erarbeiteten Ansätze zur Optimierung der ersten Schritte in der Wertschöpfungskette der Hochtechnologiemetalle können weltweit auf weitere Lagerstätten dieses Typs übertragen werden.

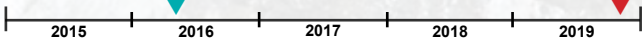
Kontakt

CBM Gesellschaft für Consulting,
Business und Management mbH
Niederbexbacher Straße 67
66450 Bexbach
Prof. Dr. Mathias J. Bauer | Tel. +49 6826 510910
E-Mail: bauer@cbm-ac.de
Projektlaufzeit: 01.05.2016 – 30.04.2019
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 113



SEEsand

Gewinnung schwerer Seltenerdelemente (SEE) aus Schwermineralsanden



Zielstellung

Die Fortentwicklung grüner Technologien wie Windkraft und Elektromobilität erfordert u. a. den Einsatz „Schwerer Seltener Erden“, etwa des Metalls Dysprosium, das Permanentmagnete für Windkraftanlagen leistungsfähiger macht.

Bereits in der Vergangenheit wurde aus den Sanden der Ostseeküste das Mineral Zirkon gewonnen. Dabei wurde auch erkannt, dass dieser Zirkon Seltenerdelemente enthält. Heute werden jährlich allein mehr als 500.000 m³ Sand aus der Ostsee für die Sanierung sturmgeschädigter Strände (Strandaufspülung) gewonnen. Eine Nutzung ohnehin für den Küstenschutz abgebauter Sande zur Rohstoffgewinnung macht das Projekt nachhaltig im besten Sinne.



Abb. 2: Aufstromklassierer zur Korngrößentrennung des Rohsand, Foto: Schuldt, André Voß Erdbau und Transport GmbH

Ergebnisse

Im Archiv des Landesamts für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern fand sich ein Schatz von mehr als 20.000 Datensätzen zu Schwermineralen im Ostseesand. Diese wurden digitalisiert, visualisiert und als Wegweiser für die Beurteilung des Schwermineralpotenzials in den Sanden nutzbar gemacht. Allein für 300 Mio. t Küsten-

sand des Feldes „Markgrafenheide“ wurde ein Potenzial von 2,4 Mio. t Schwermineralen berechnet.

Der Zirkon des Ostseesandes enthält die wertvollen Schweren Seltener Erden angereichert. Erster Schritt zu deren Gewinnung ist die Abtrennung des Zirkons durch mechanische

Aufbereitung (Bild 3). Dazu werden die Komponenten des Ostseesandes zunächst nach ihrer Dichte sortiert, z.B. mit Schüttelherden. Durch Anwendung von Magneten verschiedener Stärke werden die schweren Anteile weiter aufgetrennt:

- stark magnetischer Magnetit
- schwächer magnetischer Ilmenit
- schwach magnetischer Granat (etwa 80 Prozent des Schwermineralgehalts)
- nicht magnetischer Zirkon

Der Zirkon wird durch elektrostatische Aufbereitung mittels elektrischer Hochspannung im Bereich von 30.000 Volt weiter gereinigt.

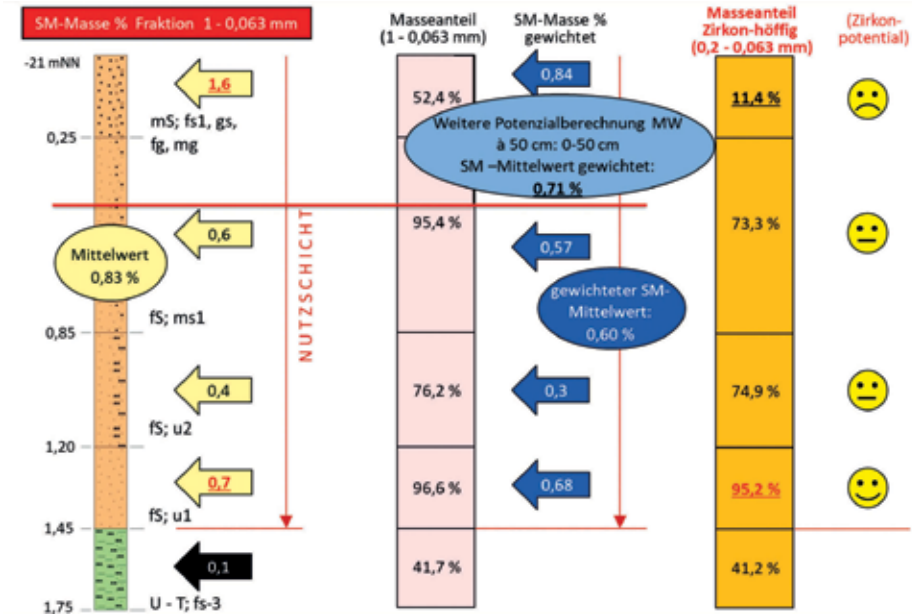


Abb. 1: Korngrößenverteilung vs. SM-Gehalt Beispiel: Station 50123, Quelle: Börner, LUNG



Produkte der mechanischen Aufbereitung sind neben dem Zirkon wertvolle Nebenprodukte wie Magnetit (Eisenerz), Ilmenit und Rutil (zur Gewinnung des Metalls Titan) sowie Granat (Schleif- oder Sandstrahlmittel). Das als wichtigstes Nebenprodukt anfallende „Leichtgewicht“ Quarzsand steht nach Abtrennung der Schwerminerale weiterhin für die Sanierung der Strände und die Baustoff- oder Glasindustrie zur Verfügung.

Die technische Machbarkeit der Schwermineralgewinnung ist in einem Pilotversuch an einer Großprobe von 200 Tonnen Sand nachgewiesen worden. Der gewonnene Zirkon wurde chemisch weiterverarbeitet. Im Projekt wurden dazu chemische Laugungsverfahren mit starken Mineralsäuren erprobt. Diese lösen die Seltenen Erden mit einem Ausbringen von ca. 70 % heraus. Zur Steigerung dieses Ausbringens wurde ein alkalischer Schmelzaufschluss mit anschließender saurer Laugung der Seltenen Erden entwickelt.

Aus den Laugungslösungen sind die Seltenen Erden gefällt und durch Glühen der Fällungsprodukte in Oxide überführt worden.

Parallel zu den chemischen Untersuchungen wurden biotechnologische Verfahren zur Gewinnung der Seltenen Erden erprobt. Während Biolaugungsverfahren zum Herauslösen der Seltenen Erden eine begrenzte Effizienz aufwiesen, zeigten die Untersuchungen zur Abtrennung der Seltenen Erden aus den Laugungslösungen durch Bindung an biologische Materialien (sog. Biosorption) gute Erfolge. Diese konnten nicht nur aus den Lösungen mit gutem Ausbringen gewonnen, sondern auch bis zu einem gewissen Umfang voneinander getrennt werden.

Der verbleibende Zirkon bzw. das anfallende Zirkoniumoxid (Zirkonerde) stellen wertvolle Rohstoffe für die Feuerfest-, Keramik- und Schleifmittelindustrie dar.

Ausblick

Im Rahmen des Projektes konnte ein großes Potenzial an Schwermineralen und Zirkon in den Küstensanden der Ostsee nachgewiesen werden. Außerdem wurden auch für Sandlagerstätten im Binnenland interessante Zirkon- und Seltenerdgehalte sowie deren Gewinnbarkeit nachgewiesen. Dies eröffnet im Anschluss an das Projekt Potenziale zur technischen Umsetzung.

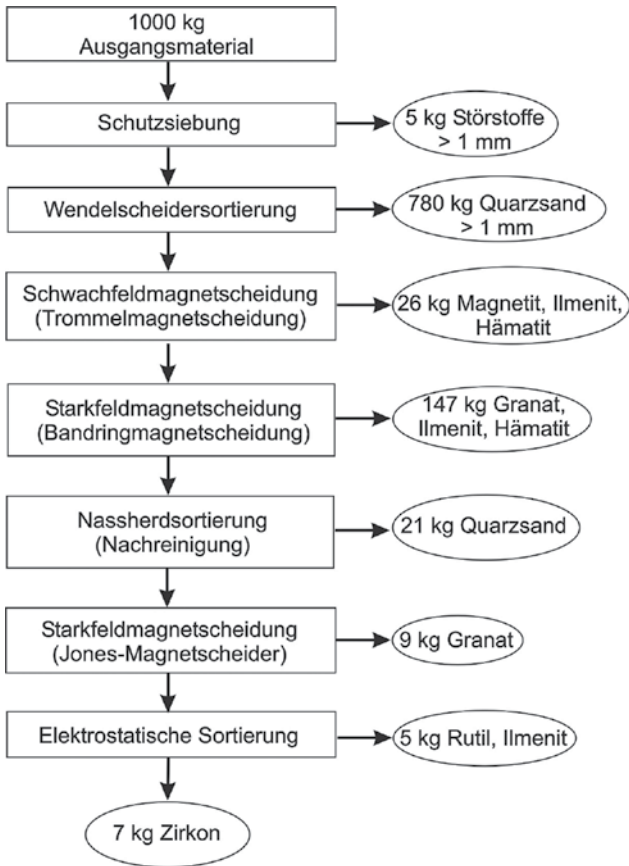


Abb. 3: Schema der mechanischen Sand-Aufbereitung zur Zirkonabtrennung, Quelle: Zhuo Ma, TU Clausthal, Mirko Martin, GEOS

Die Anwendung biologischer Verfahren eröffnet außerdem neue Möglichkeiten, die Gewinnung der Seltenen Erden umweltfreundlicher zu gestalten.

Kontakt

G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH
Schwarze Kiefern 2
09633 Halsbrücke
Dipl.-Chem. Mirko Martin | Tel. +49 3731 369-296
E-Mail: m.martin@geosfreiberg.de
Projektlaufzeit: 01.05.2016 – 31.10.2019
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 115

SE-FLECX

Selektive Flüssig-Flüssig-Extraktion von Lanthanoiden und Actinoiden durch präorganisierte Calixarene

Entwicklung neuartiger Extraktionsmittel

Seltene Erden (Lanthanoide) sind aus einer Vielzahl heutiger Produkte nicht mehr wegzudenken. Dazu gehören sowohl Gegenstände des täglichen Bedarfs, wie LCD-Bildschirme oder Laptop-Akkus, als auch hochspezifische Anwendungen, wie Dauermagnete in Windkraftanlagen. Um eine sichere Versorgung mit diesen Metallen zu gewährleisten, müssen neue und innovative Methoden zur Aufbereitung von Erzen und Konzentraten sowie zur Verbesserung der weiteren Prozesskette durch die Entwicklung neuartiger Extraktionsmittel gefunden werden. Dem SE-FLECX-Forscherteam ist es gelungen, neue Wege der Extraktion zu eröffnen (Abb. 1).

Seltene Erden aus unkonventionellen Rohstoffen

Heutzutage werden Seltene Erden vor allem aus dem Mineral Bastnäsit gewonnen, obwohl sie in mehr als 200 Mineralen vorkommen. Andererseits sind die Diversifikation der Rohstoffe und die Erarbeitung neuer, innovativer Methoden entscheidende Schlüsselwörter für die Zukunft des Bergbaus und der Metallurgie. Eine vielversprechende Quelle für Seltene Erden aber auch für Zirkonium (vergesellschaftet mit Hafnium), Mangan und Niob ist das Mineral Eudialyt, das Gegenstand

der umfangreichen Untersuchungen war. Die komplexe Zusammensetzung des Minerals bietet zwar die Chance mehrere Wertkomponenten gleichzeitig zu gewinnen, die vollständige Verwertung erfordert jedoch eine Kombination mehrerer Technologien im Gesamtprozess sowie umfangreiche Optimierungsarbeit.

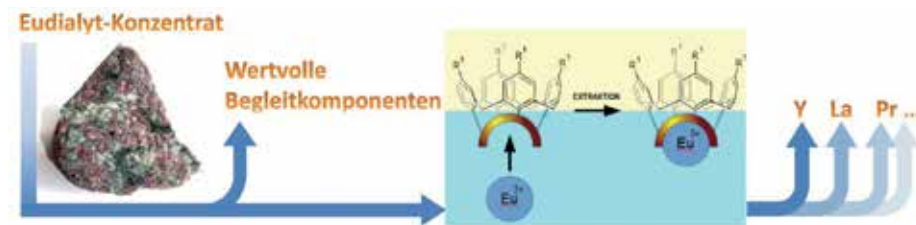


Abb. 1: Das Projektkonzept, Quelle: HZDR-HIF

Im Projekt wurden neben der Laugbarkeit des Eudialyts unterschiedliche hydro- und pyrometallurgische Methoden zur Trennung wertvoller Begleitkomponenten in Gruppen konzipiert, untersucht und bewertet (Abb. 2). Es ist gelungen, sowohl das optimale Laugungsverfahren zu entwickeln als auch Seltene Erden von den meisten Begleitkomponenten durch Fällung und selektive Sulfatisierung zu separieren.

Containermoleküle zur effizienten Gewinnung Seltener Erden

Aufgrund der chemischen Ähnlichkeiten der einzelnen Seltenerden ist ihre Trennung kostspielig und mit hohem Aufwand

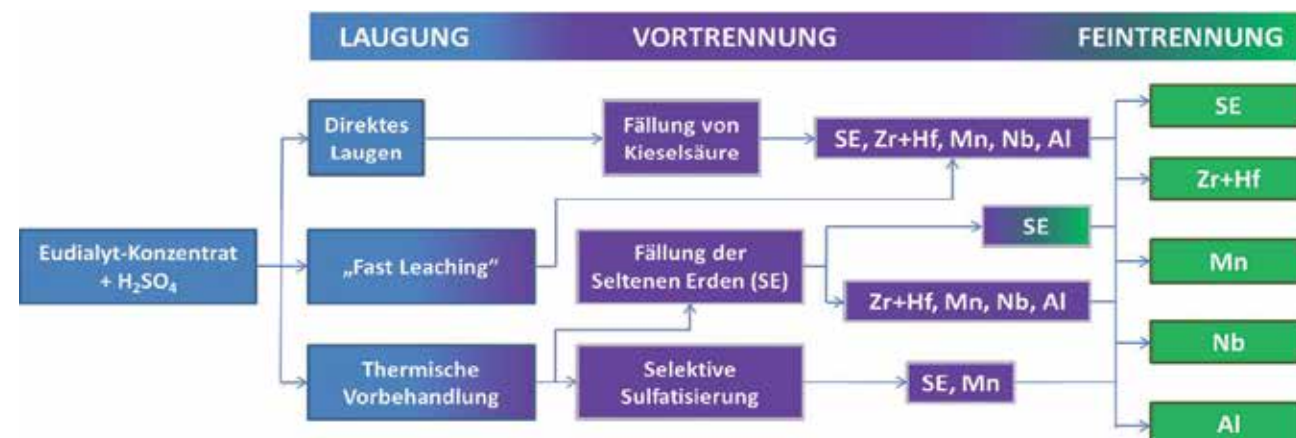


Abb. 2: Überblick über mögliche Laugungs- und Trennungsmethoden bei der Eudialyt-Verarbeitung, Quelle HZDR-HIF

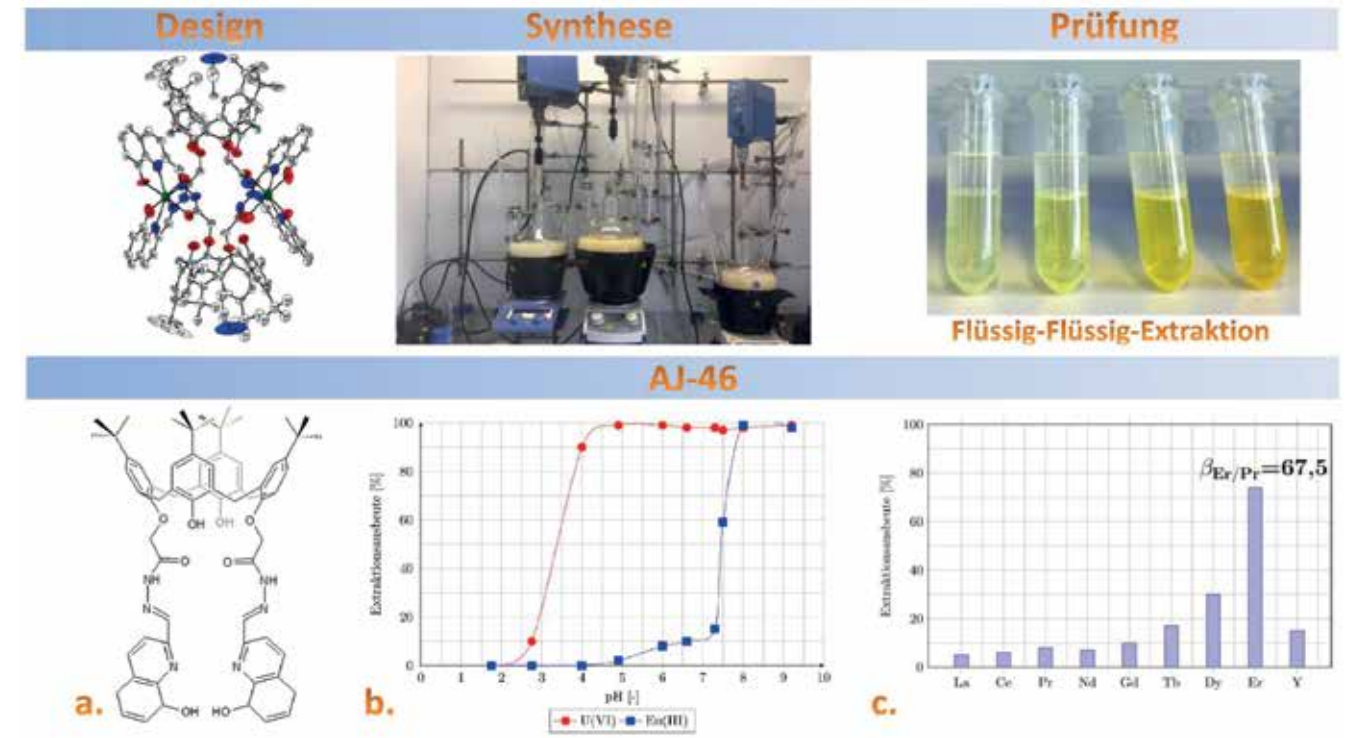


Abb. 3: Der Entwicklungsweg des AJ-46 und sein Extraktionsverhalten, Quelle HZDR-HIF

verbunden. Im Projekt wurde der Einsatz von besonderen Containermolekülen, den sogenannten Calix[4]arenen, untersucht und bewertet. Das Forscherteam hat neue Verbindungen entworfen, Wege zur effizienten Synthese erarbeitet und die Verbindungen in realen und Modellsystemen getestet (Abb. 3).

Durch gezielte Modifikationen in den Calixaren-Strukturen, konnten im Projekt neue Verbindungen gefunden werden, die sehr selektiv auf die Seltenen Erden ansprechen und sie dadurch effektiver als gewöhnliche Extraktionsmittel, beispielsweise Di-(2-ethylhexyl)phosphorsäure, aus den wässrigen Lösungen herausziehen. Ein weiterer berücksichtigter und wichtiger Aspekt ist die Trennung der wertvollen Metalle von radioaktiven Verunreinigungen wie Uran und Thorium.

Insbesondere ein Containermolekül-Vertreter, das sogenannte AJ-46 (Abb. 3a), zeigt zwei besondere Eigenschaften. Zum einen ist er in der Lage, Uran von den Seltenen Erden abzutrennen (Abb. 3b), zum anderen reagiert dieser selektiv auf bestimmte Seltene Erden, beispielsweise Erbium (Abb. 3c). Bei Extraktionsuntersuchungen mit Modelllösungen konnte ein bemerkenswerter Trennungsfaktor $\beta_{Er/Pr}$ von 67,5 erreicht werden. Das gefundene Containermolekül kann somit bei zwei wichtigen Prozessschritten eingesetzt werden: bei der Abtrennung radioaktiver Störelemente (Actinoide) und bei der Separierung von Seltenen Erden.

Ausblick

Die Wissenschaftler im SE-FLECX-Projekt haben einen wichtigen Grundstein zu neuen innovativen Wegen gesetzt. Die Entwicklung eines marktreifen Gesamtprozesses bedarf jedoch weiterer intensiver Forschung. Damit die entwickelten Calix[4]arene nicht nur wissenschaftlich sondern auch wirtschaftlich einen Erfolg darstellen, müssen die Verbindungen neben ihrer Eignung zur Extraktion und Auftrennung zukünftig auch andere Eigenschaften wie günstige Synthese, optimale Löslichkeit in der organischen Phase und ausgeprägte Stabilität gegenüber Säuren und Basen aufweisen.

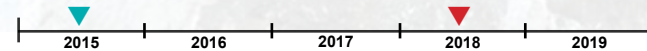
Kontakt

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie
Abteilung Metallurgie und Recycling
Chemnitz Straße 40
09599 Freiberg
Prof. Dr. Christiane Scharf | Tel. +49 351 260 5529
E-Mail: c.scharf@hzdr.de
Projektlaufzeit: 01.05.2015 – 31.10.2018
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 116



SEM²

Selten-Erden-Metallurgie – Fortgeschrittene Methoden für die optimierte Gewinnung und Aufbereitung am Beispiel von Ionenadsorptionstonen



Wirtschaftlich und ökologisch

Inhalt des SEM²-Projekts ist es, Lagerstätten der Seltenen Erden (SEE) in chemisch verwitterten Lateritböden mit optimierten Extraktions- und Aufbereitungsverfahren elementselektiv, kostengünstig und nachhaltig zu erschließen. Diese SEE-reichen Laterite bestehen hauptsächlich aus dem Tonmineral Kaolinit und weiteren Schichtsilikaten, an welche adsorptiv vor allem Lanthan (La), Cer (Ce), Praseodym (Pr), Neodym (Nd), Samarium (Sm), Terbium (Tb), Dysprosium (Dy) und Yttrium (Y) gebunden sind.

Das vorgeschlagene Verfahren zielt darauf ab, die Wertstoffe ohne Entnahme der Bodenschichten zu laugen, um die negativen Einflüsse auf das Ökosystem signifikant zu reduzieren und auf die Anlage von großflächigen Schlammbecken (Tailings) zu verzichten.

Ergebnisse

Die favorisierte bergmännische Lösung basiert einerseits auf der bekannten und bewährten In-Situ-Recovery/In-Situ-Leaching (ISR/ISL)-Technologie für tiefe Lagerstätten und andererseits der gesteuerten Horizontalbohrtechnik für oberflächennahe grabenlose Bauweise.

Die Lagerstätte soll durch ein untertägliches fächerförmiges Bohrnetz erschlossen werden. Durch pneumatisches Fracturing mit komprimiertem, inerten Stickstoff in die Laterit-Abfolgen soll der Laugungsprozess in den porösen aber gering-permeablen Tonschichten des Bodens zeitlich und lösungstechnisch infolge der Auflockerung verbessert werden. Nach dem Laugungsprozess wird die Suspension in einem Basisbohrlochsystem erfasst und danach über Tage gepumpt und in Bioreaktoren weiter verarbeitet.

An Proben aus der Lateritlagerstätte im Nordwesten von Madagaskar erfolgten die Laboruntersuchungen.

Mittels einer neu konstruierten Triaxialanlage wurden dazu Druck- und Pulsabfolgen für eine optimale Riss- bzw. Fissurenbildung ermittelt (Abb. 1).

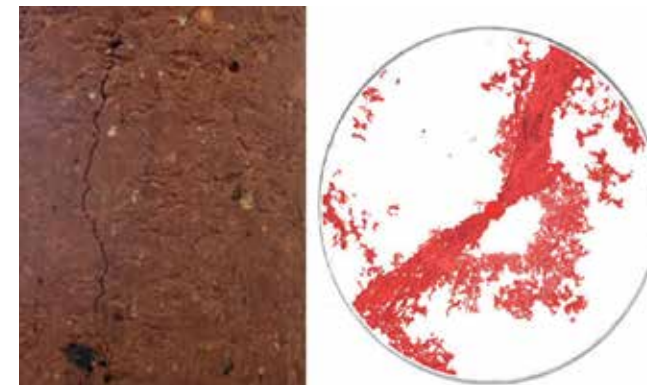


Abb. 1: Nachweis der Risserzeugung durch pneumatisches Fracturing mittels Computertomografie, Quelle: GUB Lauta; GE Sensing und Inspection Technologies Wunstorf

Bei den chemischen Methoden konnten die besten Laugungsergebnisse mit Ammoniumsulfat-Lösungen sowie anschließender Fällung mit Oxalsäure erzielt und eine fast komplette Ausfällung erreicht werden.

Die in diesem Projekt zur Biolaugung untersuchten Laugungsreagenzien, Polyglutaminsäure (PGA) und Zitronensäure, können in Suspensionsansätzen 75 bis 100 % bzw. 25 bis 50 % der adsorbierten SEE freisetzen. Auffällig ist, dass Cer bei keinem der gewählten Versuchsansätze erfolgreich gelaut werden konnte (Abb. 2).

Als weitere Abtrennungs-Variante für Seltene Erden aus den Leachinglösungen wurden Ionenaustauscher verwendet. Als beste Ionenaustauschervariante mit Leachinglösung auf der Basis von 0,25 m Ammoniumsulfat-Lösung erwies sich der kommerzielle Ionenaustauscher Lewatit MonoPlus S-108.

Ionenaustauscher sind bei der Abtrennung der Seltenen Erden aus den Leachinglösungen ein großer Kostenfaktor. Als Alternativen sind deshalb Biosorbentien auf der Basis nachwachsender Rohstoffe untersucht worden. Bei allen Versuchen erwiesen sich die Biosorbentien auf der Basis von Wasserlinsen als eine preiswerte Variante mit guter Sorptionskapazität (Abb. 3).

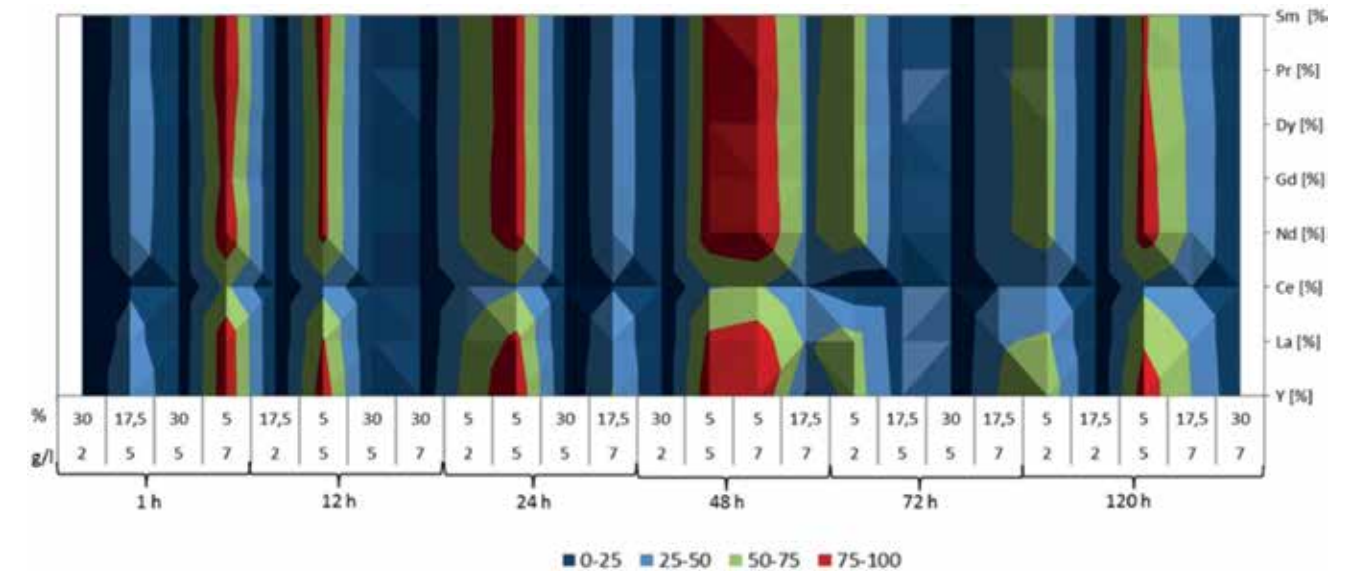


Abb. 2: Ausbeuten an Seltenen Erden durch die Laugung mit Polyglutaminsäure bei 22°C, Quelle: Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie

Weitere Untersuchungen erfolgten zur Etablierung eines auf spezialisierten Hefekulturen basierenden Biosorptionsverfahrens. Im Projektverlauf zeigte sich, dass Hefezellkulturen für spezifische SEE-Trennverfahren eher nicht geeignet sind, da es an den Zellen zu unspezifischen

Unter Anwendung geochemischer und verfahrensschemischer Software (aquaC, TRN) konnten erfolgreich die Prozessschritte der Extraktion aus Tonmaterialien sowie der Aufkonzentrierung bzw. Abtrennung der Seltenen Erden aus den Laugungslösungen simuliert werden.

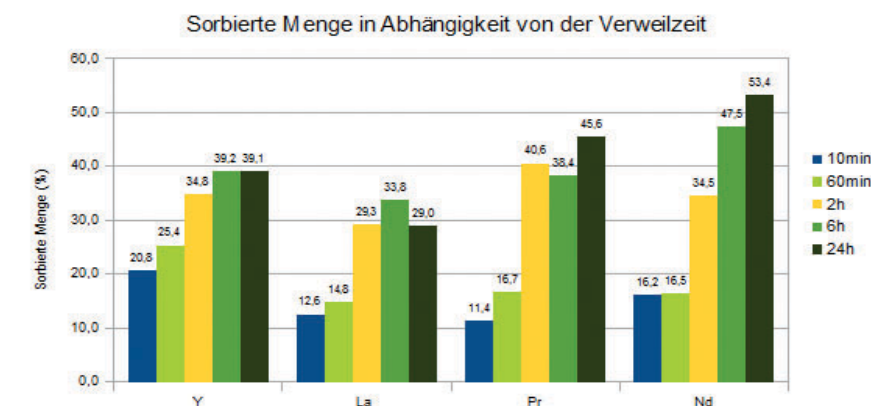


Abb. 3: Einfluss der Verweilzeit auf die Sorptionskapazität am Beispiel für immobilisierte Wasserlinsen, Quelle: GMBU Halle

Interaktionen mit anderen Metallen kommen kann. Die Immobilisierung der Proteine konnte jedoch über genetisch modifizierte Versionen der Bindepeptide generiert und deren Fähigkeit nachgewiesen werden, Terbium zu binden.

Eine Erweiterung der thermodynamischen Datenbasis erfolgte für die untersuchten Seltenen Erden Eu(III), Tb(III), Cm(III) und Lu(III). Mittels Sensitivitätsanalysen konnten kritische Parameter identifiziert werden, die zur Parameteroptimierung sowie zur Verfahrensbewertung bezüglich Effizienz, Nachhaltigkeit und Ökologie erforderlich sind.

Ausblick

Die im Labormaßstab entwickelten und experimentell verifizierten Modelle sollen als Grundlage für großtechnische Versuche zur Konkretisierung und Validierung der einzelnen Verfahrensschritte bei der Gewinnung von Seltenen Erden dienen, um die wirtschaftliche und ökologische Bewertung des Gesamtprozesses weiter zu qualifizieren.

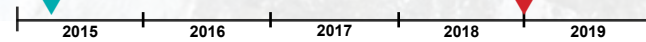
Kontakt

G.U.B. Ingenieur AG
Katharinenstr. 11
08056 Zwickau
Dr. Wilfried Hüls | Tel. +49 375 27175-0
E-Mail: info@gub-ing.de
Projektlaufzeit: 01.06.2015 – 31.05.2018
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 116



UPNS4D+

Untertägiges 4D+ Positionierungs-, Navigations- und Mapping-System zur hochselektiven, effizienten und im höchsten Maße sicheren Gewinnung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe



Einführung

Vorhandene heimische Lagerstätten weisen eine komplexe geologische Struktur mit geringen Abbaumächtigkeiten in großen Teufen auf. Um entsprechende abbautechnisch anspruchsvolle Lagerstätten effektiv nutzen zu können, wurde ein untergetaugliches mobiles Positionierungs- und Navigationssystem, UPNS4D+, für die Lagerstätten erkundung entwickelt. Es wurde zunächst im Forschungs- und Lehrbergwerk Reiche Zeche der TU Bergakademie Freiberg getestet und dann erfolgreich unter produktionsnahen Bedingungen in das Anhydritbergwerk der Firma maxit Baustoffwerke GmbH in Krölpa (Thüringen) portiert. Entwickelte Technologien sind auf ein typisches Produktionsfahrzeug, einen untertägigen Lader der Firma GHH, übertragen worden.

Zielstellung

UPNS4D+ trägt zur Automatisierung eines schonenden, selektiven Abbaus wirtschaftsstrategischer Rohstoffe auch unter lebensfeindlichen Arbeitsumgebungen wie hohen Temperaturen, Lärm, giftigen Gasen und Stäuben bei. Relevante Informationen werden erfasst, in das Bergwerksinformationssystem integriert, aufbereitet, visualisiert und ausgewertet für eine optimierte Entscheidungsfindung durch den leitenden Ingenieur.

Die sensorische Datenaufnahme erfolgt entweder als teil-autonome Ersterkundung neu aufgefahrener Strecken oder



Abb. 1: Autonomes UPNS4D+-Erkundungsfahrzeug mit Sensoren, Foto: indurad

als autonome Wiederholungsbeobachtung für eine Überwachung und Änderungsdetektion des Grubengebäudes sowie der technischen Infrastruktur. Dabei werden relevante Veränderungen des Bergwerks erfasst und können in die Bergwerksreferenz, das Risswerk überführt werden.

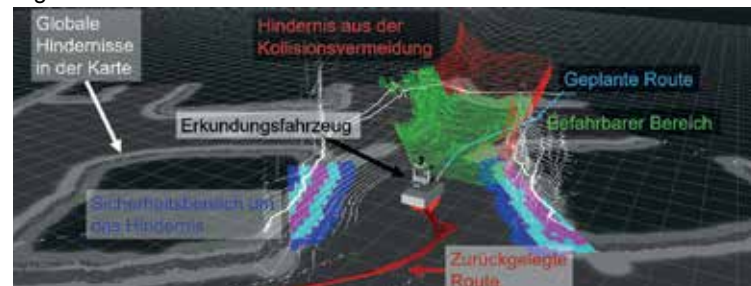


Abb. 2: Dynamische Pfadplanung zur Umfahrung von Hindernissen, Quelle: RWTH Aachen, Inst. AMT

Ergebnisse

Das Gesamtsystem ist aufgeteilt in einen Erkundungs- und einen Produktionsbetrieb. Gesteuert wird das Gesamtsystem über einen Leitstand, der Verbindungen zum Erkundungsfahrzeug und zum Produktionsfahrzeug hält. Eine Datenbank (mapitServer) dient dazu alle geometrischen Daten des Grubengebäudes vorzuhalten, wobei erkannte Merkmale in der Datenbank ortsgenau annotiert werden können.

Das Erkundungssystem besteht aus einem eigens im Projekt erstellten batteriebetriebenen Kettenfahrzeug, das als Sensorträger dient (Abb. 1). Erweitert kann es auch schienengebunden eingesetzt werden. Als Sensoranbauten dienen diverse optische Messgeräte, wie 2D-, 3D-Lidar, 2D-, 3D-Kameras und Wärmebildkameras, um das Umfeld mit hoher Auflösung zu kartographieren. Weitere Lidar-Scanner dienen der Erfassung der direkten Umgebung für eine autonome Navigation und Fahrplanung. Integraler Bestandteil ist dabei die Kollisionsvermeidung.

In der in 3D erfassten Umgebung können Hindernisse erkannt und so die Fahrplanung dynamisch angepasst werden (Abb. 2). Die bei jeder Fahrt neu erfassten Konturdaten des Grubengebäudes und der Haufwerke werden immer wieder neu dem Markscheidewesen zugeführt und aktualisieren so fortlaufend die Datenbank des mapitServers. Zugleich werden



Abb. 3: Anzeige der Pfadplanung und Sensordaten in der Referenzkarte des Bergwerks während der autonomen Fahrt, Frontkamerabild am LHD, Quelle: indurad

spezifische Eigenheiten der Lagerstätten sowie charakteristische Merkmale verzeichnet, die von den Umfeld-Radaren der Abbaumaschinen schnell und sicher erkannt werden können.

Als Produktionssystem wurde ein LHD Niederflurladefahrzeug verwendet (LHD bedeutet Load, Haul and Dump, also Laden, Fördern und Abkippen). Während des Produktionsbetriebs kommen ausschließlich radarbasierte Sensoren zum Einsatz, die gegenüber anfallendem Schmutz und Staub weitgehend unempfindlich sind. So kann ein zuverlässiger Abtransport von Rohstoffen gewährleistet werden.

Radarsignaturen, die in der Datenbank annotiert sind und fortlaufend aktualisiert werden, erlauben dabei eine schnelle Positionserfassung. Dazu werden nur die für die Navigation notwendigen Daten auf das Fahrzeug übertragen, das dann autonom seinen Fahrauftrag abarbeiten kann. Wieder zurück in Reichweite einer Datenanbindung, etwa an einer Brecheranlage, wird das Fahrzeug seine Datenbank abgleichen und neue Daten der Leitstelle zur Verfügung stellen.

Aus den Radardaten können Hindernisse extrahiert werden, um die Fahrplanung an lokale Veränderungen, die sich noch nicht in der Datenbank befinden, anzupassen. Das erlaubt eine sichere Navigation in einer neuen und sich verändernden Umgebung (Abb 3).

Ausblick

Im Bergbau werden bereits automatisierte Fahrzeuge verwendet, die beispielsweise über GPS gesteuert werden. Die Ergebnisse des Projekts UPNS4D+ können nun dazu verwendet werden, die starren automatisierten Systeme flexibler zu gestalten. Entwickelte Radarsensoren können im Maschinendesign berücksichtigt werden. Der inzwischen öffentlich verfügbare mapitServer, der geometrische Information hocheffizient speichert, ist über zusätzlich annotierbare Daten flexibel einsetzbar. Vielfältige algorithmische Verfahren, die zur Umfelderkennung und Merkmalsdetektion erstellt wurden, erlauben die Weiterentwicklung der Abbau- und Rohstoffgewinnungsprozesse hin zu autonomen Systemen.

Kontakt

indurad GmbH
Belvedereallee 5
52070 Aachen
Dr. Matthias Rabel | Tel. +49 241 538070-0
E-Mail: matthias.rabel@indurad.com
Projektlaufzeit: 01.04.2015 – 31.12.2018
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 118



r⁴-Verbundprojekte

Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen



- ▶ ARGOS
- ▶ BiRec
- ▶ EcoGalN
- ▶ ELEXSA
- ▶ GRAPHIT 2.0
- ▶ Lan-Tex
- ▶ MetalSens
- ▶ MinSEM
- ▶ REWITA
- ▶ SESAM
- ▶ Theisenschlamm
- ▶ TransTech
- ▶ VAFLOW

ARGOS

Steigerung des funktionellen Recyclings entlang der Wertschöpfungskette durch Echtzeitanalyse metallreicher Aufbereitungsprodukte

Zielstellung

Mit der derzeit verfügbaren Aufbereitungstechnik können Legierungsschrotte verschiedener Herkunftsbereiche nur begrenzt sortenrein zurückgewonnen werden. Beim Recyclingprozess (Abb. 1) führt dies zum Verlust wertvoller Nebenmetalle (z. B. Nickel, Chrom, Wolfram, Niob) in der Schlacke oder, bei Verbleib im Hauptmetallstrom, zu einer Verdünnung (= nicht-funktionelles Recycling). Eine Rückgewinnung von Nebenmetallen kann durch eine sortenreine Klassifizierung und Vorsortierung von Legierungsschrotten sowie eine direkte Erkennung von Qualitätsveränderungen im Aufbereitungsprozess deutlich verbessert werden. Vor diesem Hintergrund wird im Verbundprojekt ARGOS ein Multisensor-System entwickelt, das Haupt- und Nebenmetalle in Schrotten in Echtzeit bestimmen soll. Da ein einzelner Sensor keine ausreichenden Informationen liefert, werden fünf verschiedene Sensoren genutzt und deren Einzelinformationen algorithmenbasiert verknüpft.



Abb. 1: Materialaufgabe einer Großshredderanlage, Foto: TSR Recycling GmbH & Co. KG

Ergebnisse

Für das zu entwickelnde Multisensorsystem wurde vom Projektpartner Steinert eine Testmessstrecke (Abb. 2) mit folgenden Sensortechniken geplant und konstruiert:



Abb. 2: Messtunnel zur Erhebung von Sensordaten, Foto: IWARU, STEINERT GmbH

Röntgentransmission, 3D-Lasertriangulation, Induktion, Farberkennung sowie Röntgenfluoreszenz (letztere von LLA Instruments). Das System wurde mit ausgewählten Referenzobjekten angelern. Anschließend erfolgten dynamische Messungen (Bandgeschwindigkeit: 2 m/s) verschiedener Legierungsschrotte (bereitgestellt von TSR Recycling und SJM), bei denen objektspezifische Sensordaten, (z. B. Spektren, Farbwert, Dichte, etc.) erhoben und auf Grundlage von Verfahren des maschinellen Lernens miteinander verknüpft wurden.

Zur Elementfrachten-Bestimmung bilden die Partikel- bzw. Objektgewichte relevante Bezugsgrößen, die mit den Daten des Röntgenfluoreszenzsensors (Elementgehalte) zu kombinieren sind. Mit dem Multisensor-System werden die Objektgewichte indirekt über das mit dem 3D-Sensor ermittelte Hüllvolumen bestimmt. Da die Gewicht-Hüllvolumen-Verhältnisse objektspezifisch stark variieren können, wurden hierzu entsprechende Regressionsgleichungen zur Gewichtsbestimmung abgeleitet; teilweise waren mehrere formspezifische Regressionsgleichungen in der Auswer-

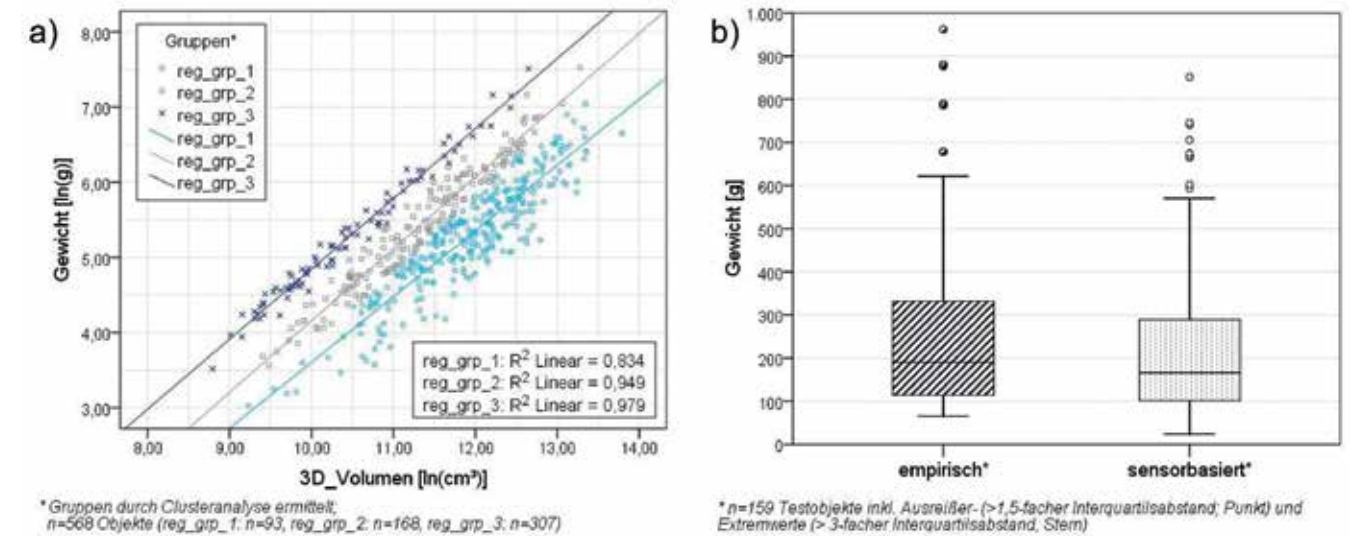


Abb. 3: a) Regressionsgeraden zur Bestimmung von Objektgewichten (für 3D-Sensor) b) Vergleich mittlerer Objektgewichte von Testobjekten aus geschredderten Altkarossern (30-120 mm), Quelle: IWARU

tesoftware zu hinterlegen (Abb. 3 a). Im Multisensor-System findet die Auswahl der jeweils für die Auswertung erforderlichen objektspezifischen Regressionsgleichung anhand objektspezifischer Merkmale (z. B. mittlere Objekthöhe) statt. Die mit Eisenschrotten durchgeführte Systemvalidierung zeigte, dass mit diesem Ansatz ein durchschnittliches Objektgewicht bestimmt werden kann, das nur 13 % vom tatsächlichen Gewicht abweicht (Abb. 3 b).

Aktuell ist bei ausreichender Vereinzelung der Objekte auf dem Förderband eine Bestimmung von Haupt- und Spurenmetallen mit dem hier betrachteten System grundsätzlich möglich. Darüber hinaus können Materialgruppen, die mit der Röntgenfluoreszenz nicht erkennbar sind (z. B. leichte Elemente, wie Aluminium), über weitere Sensoren klassifiziert werden. Hierzu wurde eine Mischfraktion (Aluminium-, Messing-, Kupfer-, Zink-, VA- und Eisen-Schrotte) analysiert. Aluminiumobjekte konnten hierbei mit einer Präzision von 90 % klassifiziert werden. Einige Elemente sind aufgrund der kurzen Messzeit von 10 ms nicht direkt messbar. Auch hier führt eine intelligente Kombination der anderen Sensoren zu einer Erkennung.

Faktoren, die das Messergebnis negativ beeinflussen können, sind z.B. Oberflächenbeschichtungen (verchromte, vernickelte Objekte), Materialverbunde und rollende Objekte. Letztere können aufgrund ihrer Bewegung auf dem

Förderband nicht ausreichend genau abgebildet werden. Derzeit erfolgen Untersuchungen zur Validierung des Gesamtsystems.

Ausblick

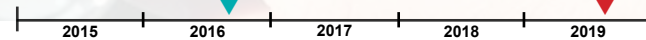
Im Weiteren werden Umsetzungskonzepte für den großtechnischen Einsatz des Multisensor-Systems in Recyclingbetrieben erarbeitet. Zusätzlicher Forschungsbedarf ergibt sich insbesondere bei der Echtzeitanalyse von sehr heterogenen Stoffströmen (z. B. Input einer Aufbereitungsanlage) sowie im Hinblick auf eine zu integrierende Prozesssteuerung.

Kontakt

IWARU Institut für Wasser•Ressourcen•Umwelt
 an der FH Münster
 Corrensstraße 25
 48149 Münster
 Prof. Dr. Sabine Flamme | Tel. +49 251 8365-253
 E-Mail: flamme@fh-muenster.de
 Projektlaufzeit: 01.05.2016 – 31.10.2019
 Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 105

BiRec

Entwicklung einer nachhaltigen Prozessroute zur innereuropäischen Aufbereitung von Bismutschäumen durch Kombination innovativer Raffinationsverfahren



Zielstellung

Die weltweite Bismut-Nachfrage hat sich seit 1990 verdoppelt. Prognostiziert wird eine steigende Tendenz. Infolge der zunehmenden Verknappung und Verteuerung natürlicher Ressourcen durch die unerwartet starken Impulse einiger Schwellenländer (allen voran China) auf die Rohstoffnachfrage, ist eine davon unabhängige Bismut-Gewinnung aus Reststoffen der Bleiraffination von strategischer Relevanz.

Deshalb zielt das r⁴-Projekt BiRec auf die Entwicklung einer nachhaltigen Prozessroute zur innereuropäischen Aufbereitung von Bismutschäumen durch die Kombination innovativer Raffinationsverfahren ab. Zu diesem Zweck wird, wie in Abbildung 1 dargestellt, die Gewinnung des als kritischen Rohstoff eingestuftes Metalls Bismut in einem dreistufigen Prozess – bestehend aus Schmelzzentrifugation, selektiver Oxidation und fraktionierter Kristallisation – entwickelt. Erfolgreich, wie die Projektergebnisse zeigen.

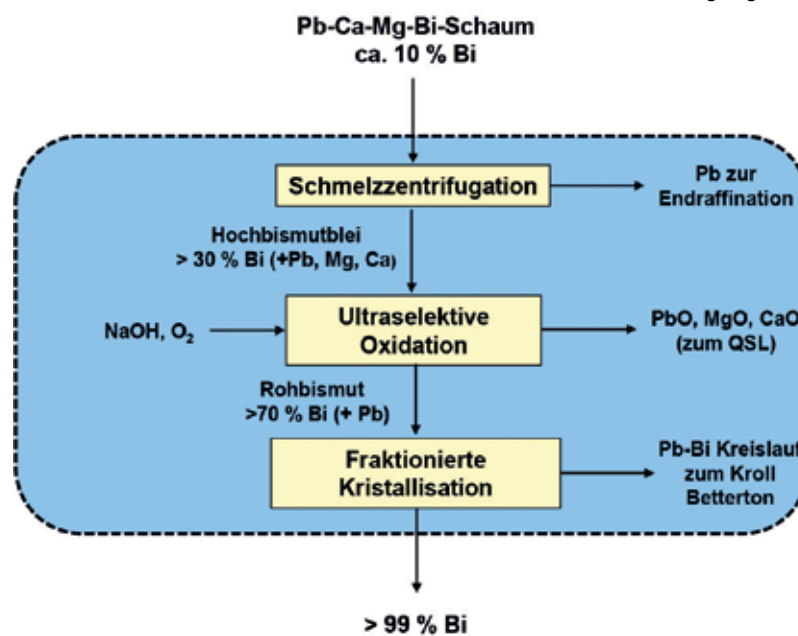


Abb. 1: Prozessroute nach BiRec

Ergebnisse

Zu Beginn des Projektes ist der als Ausgangsmaterial eingesetzte Bismutschaum zunächst charakterisiert worden. Als chemische Zusammensetzung wurden 88,0 Gew.-% Blei und 12,0 Gew.-% der intermetallischen Phase Bi₂CaMg₂ ermittelt. Bei Untersuchung der Schmelzzentrifugation sind zunächst in einer Strömungssimulation optimale Prozessparameter ermittelt worden, woraufhin ein Anlagendesign erfolgte. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen schloss sich eine experimentelle Validierung an, mit dem Ergebnis einer erfolgreichen Bismutanreicherung im batchweisen Betrieb der Schmelzzentrifuge. Den Ablauf der Schmelzzentrifugation zeigt Abbildung 2. Diese gliedert sich in einen Filtrationsschritt, bei dem Bismutschaum in die Zentrifuge eingesogen wird, das Ausschleudern von flüssigem Blei sowie die Entladung des erzeugten Filterkuchens.

Als Produkt der zentrifugalen Filtration lag ein an Bismut angereicherter Filterkuchen mit einer prozentualen Anreicherung von bis zu 311 % vor. Dieses Material stellte den Ausgangsstoff für die zweite Stufe der erprobten Prozessroute, die selektive Oxidation, dar. Das Ziel war die vollständige Abtrennung des im Filterkuchen vorliegenden Magnesiums und Calciums sowie eines Großteils des enthaltenen Bleis. Hierzu wurden in einem ersten Schritt durch Zugabe von Natriumhydroxid die Metalle Calcium und Magnesium verschlackt und von der Oberfläche der entstehenden Bismut-Blei-Legierung abgeschöpft. In einem weiteren Schritt ist durch die Einleitung von Sauerstoff Blei oxidiert und in Form von Bleioxid von der Schmelzoberfläche abgehoben worden. Dieser Vorgang wurde zur Minderung des experimentellen Versuchsaufwandes im Vorfeld mittels thermochemischer Modellierung untersucht. Beruhend auf Literaturdaten, ist dazu eine spezielle Datenbank für das System Pb-Bi-Ca-Mg-O erstellt worden. Diese Datenbank wird durch Abgleich mit ex-

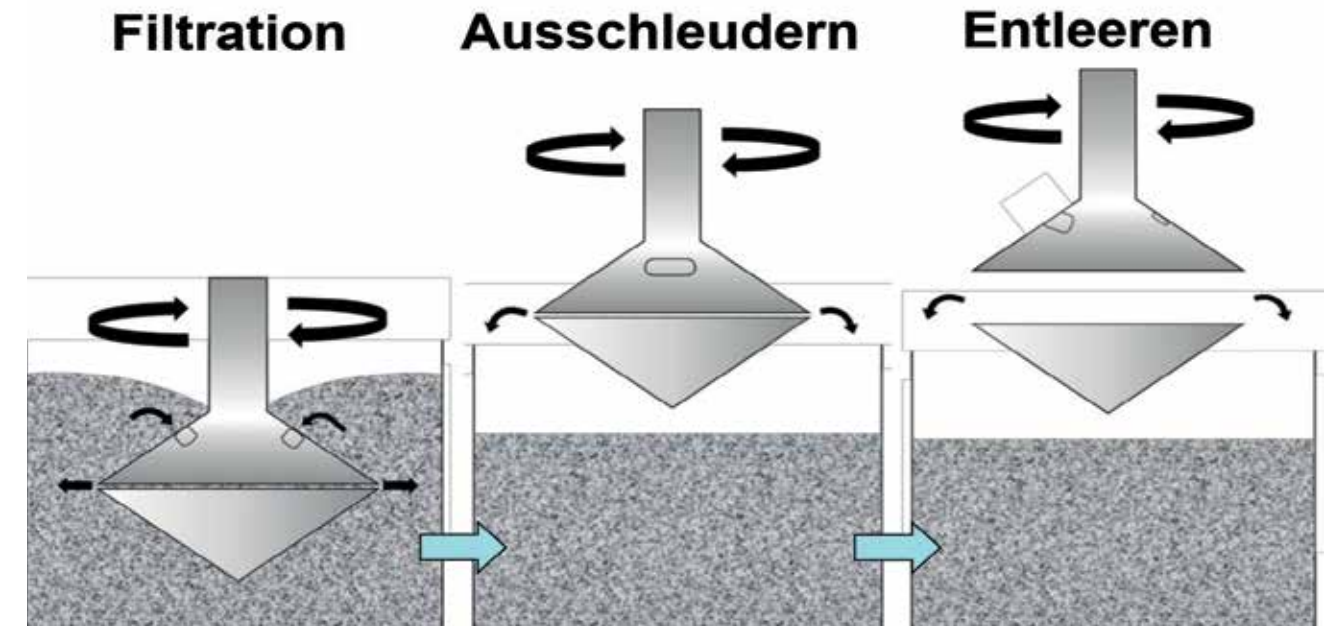


Abb. 2: Schematische Darstellung der Schmelzzentrifugation

perimentellen Erkenntnissen weiter optimiert werden. Da, aufgrund der im Verlauf der Oxidation steigenden Aktivität des Bismuts, eine zunehmende Bismutoxidation vermieden werden sollte, wurde die Sauerstoffeinleitung bei Erreichen einer Zusammensetzung von etwa 70 Gew.-% Bismut und

30 Gew.-% Blei abgebrochen. Das Resultat weist bereits, wie aus Abbildung 3 ersichtlich wird, ein für metallisches Bismut typisches grobkristallines Gefüge sowie eine blau-violette Farbgebung auf.

Ausblick

Das beschriebene Verfahren zur Herstellung einer synthetischen Bismut Blei Legierung soll vom im Projekt BiRec in weiten Teilen erreichten Technikumsmaßstab in den industriellen Maßstab überführt werden.

Im Anschluss ist eine wirtschaftliche Betrachtung des Gesamtprozesses vorgesehen.

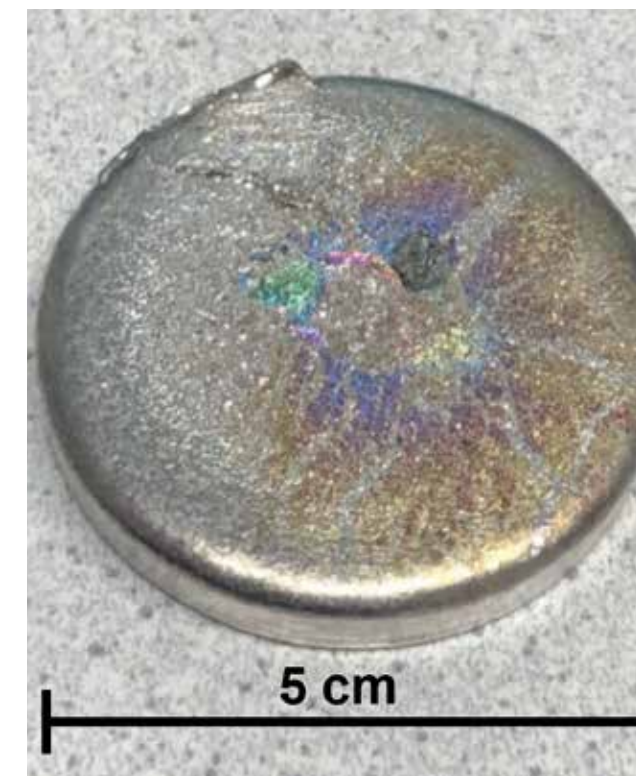


Abb. 3: Bismut-Blei-Legierung

Kontakt

Berzelius Stolberg GmbH
Binsfeldhammer 14
52224 Stolberg (Rheinland)
Dipl.-Ing. Knut Esser | Tel. +49 2402 1206-500
E-Mail: kesser.bb@berzelius.de
Projektlaufzeit: 01.09.2016 – 31.08.2019
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 105

EcoGaIN

Gewinnung von Gallium aus Produktionsabfällen der Halbleiter-Industrie

Zielstellung

Gallium verbindet die Welt – Computer-Chips mit dem Halbleiterwerkstoff Galliumarsenid (GaAs) stecken in Smartphones und Tablet-PCs. Zunehmend findet es sich auch in Hochleistungs-LED's und der Lasertechnik.

EcoGaIN erforschte die Rückgewinnung von Gallium (Ga) sowie des Arsens (As) und von Kieselsäure aus Produktionsabfällen der Halbleiterindustrie. Über eine Verarbeitungsprozesskette wurden die Abfälle erfolgreich bis zum hochreinen Gallium konzentriert, welches dem Produktionsprozess rückgeführt werden kann.

Ergebnisse

Als Abfälle mussten sowohl Gallium- und Arsen-haltige Feststoffe, als auch halbkonzentrierte und stark verdünnte Lösungen unterschiedlichster Zusammensetzung verar-

beitet werden. Dies erforderte eine sehr differenzierte Herangehensweise für jeden einzelnen Abfallstoff. Für jeden Abfallstrom wurden deshalb folgende separate Verfahren entwickelt:

- Laugung, Extraktion, Fällung und Konzentrierung von Ga-haltigen Feststoffen (Abb. 1)
- Ga-As-Trennung aus konzentrierten Lösungen mittels Membrantechnologien
- Anreicherung von Ga beziehungsweise As aus stark verdünnten Lösungen an Eisen-basierten Sorptionsmitteln und Desorption von Ga (As) zu konzentrierten Lösungen
- Selektive Biosorption von Ga und As aus verdünnten Lösungen über Biopanning und S-Layer mit metalloxi-dischen (Nano)partikeln (Abb. 2).



Abb. 1: Fällung und Konzentrierung von Ga-As-haltigen Verbindungen aus schwefelsaurer Feststofflaugung im Kübelmaßstab; a) Originale Ga-haltige Fe(III)-Laugungslösung, b) Reduktion des Fe(III) zu Fe(II), c) Fällung von schwerlöslichen Ga-Verbindungen durch pH-Einstellung, d) Angereicherte sedimentierte Ga-Verbindungen fertig zur Weiterverarbeitung zu reinem Gallium, Foto: Dr. F. Haubrich, GEOS



Sowohl die Ga-haltigen Präzipitate als auch Lösungen wurden chemisch und per REM-EDX, XRD, IR-, Raman- und UV/VIS-Spektroskopie charakterisiert, um eine Datenbasis zu den Ga-As-haltigen Feststoffen und Lösungen zu erstellen.

Alle Ga-haltigen Stoffe aus Feststoffen und Lösungen werden zu Ga-Hydroxid/Arsenat-Verbindungen umgesetzt und zusammengeführt, welche in einem weiteren Verfahren zu hochreinem Gallium verarbeitet werden können.

Ausblick

Die Forschungsergebnisse sind schon während der Projektphase von der Halbleiter-Industrie umgesetzt und angewendet worden. So werden die Stoffströme getrennt behandelt und bereits beim Abfallerzeuger zu Gallium-haltigen Zwischenprodukten verarbeitet.

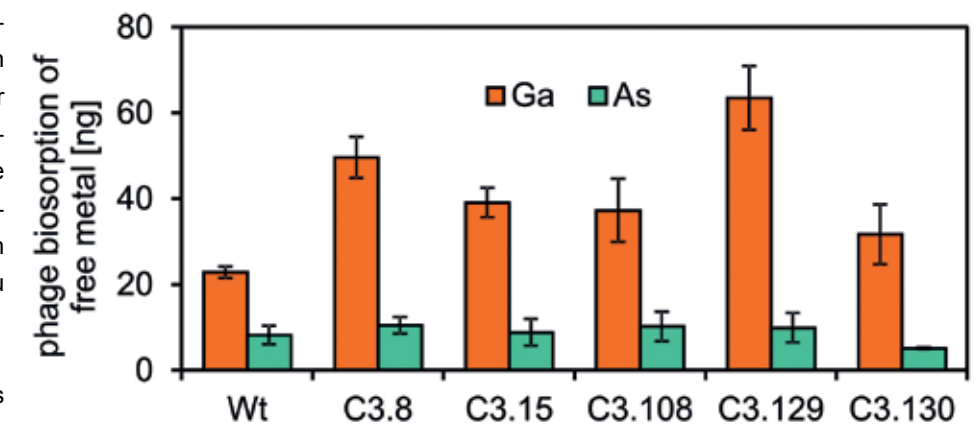


Abb. 2: Einzelklonexperimente, um die Biosorption von freiem Gallium und Arsen in verdünnten Lösungen an Phagen zu untersuchen, Grafik: N. Schönberger, HZDR

Das Ziel, möglichst eine Zero-Waste-Technologie zu entwickeln, wird im Fall des Galliums machbar sein, sowohl im technologischen als auch im ökonomischen Sinne. Die Kieselsäure aus Polierprozessen kann in anderen Bereichen wieder eingesetzt werden. Das Arsen wird aus wirtschaftlichen Gründen nicht recycelt werden können.

Die entwickelten Technologien sind bezüglich der Ga- und As-Gewinnung und -Entfernung in verschiedenen anderen Branchen einsetzbar, die ähnliche Fragestellungen aufweisen.

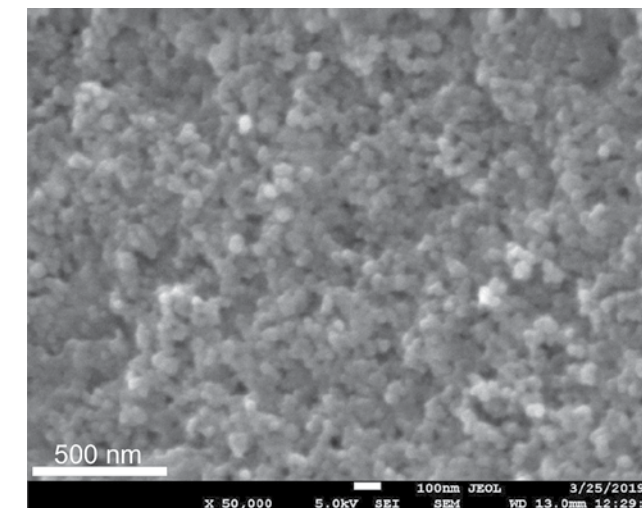


Abb. 3: Nanostrukturierte Fällprodukte aus bis zu 100 nm großen Sphärolithen, welche vermutlich Agglomerate von Kolloidpartikeln darstellen, REM-Foto: Dr. M. Trinkler, Erz&Stein

Kontakt

G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH
Schwarze Kiefern 2
09633 Halsbrücke
Dr. Frank Haubrich | Tel. +49 3731 369 132
E-Mail: f.haubrich@geosfreiberg.de
Projektlaufzeit: 01.07.2016 – 31.10.2019
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 107

ELEXSA

Elektrodynamische Fragmentierung von Schlacken und Aschen mit nachfolgender hydrothormaler Extraktion wirtschaftsstrategischer Rohstoffe aus den Schlacke/Asche-Feinfraktionen



Zielstellung

Würde Deutschland alle Metalle aus Abfällen und Reststoffen zurückgewinnen, wäre dies ein wichtiger Schritt hin zu einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft. Jährlich fallen ca. 6 Mio. Tonnen Aschen aus der Hausmüllverbrennung an. Daneben entstehen jährlich rund 13 Mio. Tonnen Eisenhüttenschlacken. Diese metallführenden Stoffströme aufzubereiten, um kritische Metalle selektiv zurückzugewinnen, war das Ziel des Verbundvorhabens „ELEXSA“. Dazu sollte eine neue Prozesskette aus selektiver Aufbereitung und selektiver Rückgewinnung realisiert werden.

Idee war es, zunächst die Zielwertstoffe aus den Aschen und Schlacken mittels Hochspannungsimpulsen in einer Feinfraktion anzureichern, die Metalle dann mit einem hydrothermalen Verfahren in Lösung zu bringen und anschließend selektiv auszufällen.

Ergebnisse

Mit Hilfe der elektrodynamischen Fragmentierung konnte das Material mit Hochspannungsimpulsen erfolgreich aufbereitet werden. Die erreichten Konzentrationen an Ziel-

metallen in den Feinfraktionen waren jedoch geringer als zunächst angenommen, was durch die Heterogenität des Materials insgesamt und die relativ kleine Probenmenge im Vergleich zum Gesamtmassestrom erklärt werden kann. Generell zeigt sich, dass ca. 30 Ma.-% der Materialien in die Feinfraktion abgetrennt werden konnten. Dieses Material wurde im zweiten Schritt der Prozesskette hydrothermal behandelt, um eine selektive Extraktion der Metalle zu ermöglichen. Die Lösungsreaktionen finden in geschlossenen Systemen bei Temperaturen > 100° C und Drücken > 1 bar in wässrigen Lösungen statt und sind sowohl für metallurgische Schlacken als auch für Aschen der thermischen Abfallverwertung geeignet. Neben Temperatur und Druck wird das Lösungspotenzial der Metalle durch den pH-Wert bestimmt. Im Vergleich zum Ausgangsmaterial, konnten aus den Stäuben bis zu 80 % Zink (Zn), 85 % Blei (Pb) und 55 % Kupfer (Cu) gelöst werden. Aus den Schlacken und Aschen waren es bis zu 50 % Zn, 55 % Pb, 60 % Cu und 27 % Chrom (Cr).

Durch Zementation (elektrochemische Abscheidung von Metallen) lassen sich die Schwermetallkonzentrationen in den Lösungen verringern und Metalle können ausgeschieden werden. Bei dieser Art von Redoxreaktion ist ein unedles elementares Metall in der Lage, ein relativ edleres Metall, das in ionischer Form gelöst ist, zum Element zu reduzieren, wobei es selbst in oxidierte ionische Form in Lösung geht. Das unedle Metall kann dabei alle ionisch gelösten Metalle, die edler sind und somit ein positiveres Normalpotenzial gemäß der elektrochemischen Spannungsreihe haben, reduzieren.

Bei der anschließenden Neutralisation saurer Lösungen mit NaOH werden die Schwermetalle vorwiegend als Hydroxide ausgefällt. Jedes Metallhydroxid hat einen spezifischen pH-Wert, bei dem die gelöst verbleibende Metallionenkonzentration den geringsten Wert hat.



Abb. 1: Flüssigschlacke beim Abgießen in das Schlackebeet; Foto: Ralf Perret



Abb. 2: Metallurgische Schlacke nach dem Brechen, Foto: Ralf Perret

Bei den Stäuben konnte durch Zementation Pb in Form von Blixit, $Pb_2(O,OH)_2Cl$ oder als PbO , Cu als CuO und Bi als $BiCl_3$ ausgefällt werden. Bei den Aschen und Schlacken wurden Pb und Cu als Chloride oder als Oxi-Hydroxide auszementiert. Infolge der anschließenden Titration der Lösungen nach der Zementation wurde Zn ausgefällt.



Abb. 3: Vorbereitung zur Analyse der aufbereiteten Proben Foto: CUTEK



Ausblick

Durch die innovative Prozesskette konnte im Projekt ELEXSA die selektive Abtrennung von Metallen aus Aschen, Schlacken und Stäuben im Labormaßstab realisiert werden. Die realisierten Verwertungswege sind jedoch – bei den gefundenen niedrigen Werten an Metallen in den untersuchten Materialien – momentan noch nicht wirtschaftlich interessant.

Kontakt

Fraunhofer Institut für Bauphysik
Fraunhoferstr. 10
83626 Valley
Dr. Sebastian Dittrich | Tel. +49 8024 643-209
E-Mail: sebastian.dittrich@ibp.fraunhofer.de
Projektlaufzeit: 01.06.2016 – 30.09.2019
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 107

GRAPHIT 2.0

Technologieentwicklung zur Gewinnung von Sekundärgraphit aus rezyklierten Kohlenstofffasern



Hightech-Rohstoff Graphit: großer Bedarf und kritische Verfügbarkeit

Die Versorgungssicherheit der deutschen Industrie mit dem wirtschaftsstrategischen Rohstoff Graphit ist als potenziell kritisch anzusehen. Hintergrund ist zum einen der große Bedarf der Hightech-Industrie und zum anderen die große Lieferabhängigkeit. Ziel des Forschungsprojekts Graphit 2.0 war deshalb die Technologieentwicklung zur Gewinnung eines Graphit-Substituts aus rezyklierten Kohlenstofffasern für die Anwendung in Speichertechnologien. Eingesetzt in Brennstoffzellen und Batterien, ist dieser Rohstoff – und damit auch sein Substitutionspotenzial – bedeutend für die Energiewende und den Ausbau von Zukunftstechnologien.

Carbonfaserverstärkte Kunststoffe, das „schwarze Gold

Carbonfaserverstärkte Kunststoffe können mit ihren Leichtbaueigenschaften und Möglichkeiten zur lastgerechten Auslegung einen wesentlichen Beitrag zur Ressourceneffizienz leisten. Jedoch kann das Potenzial des Werkstoffs auf Grund fehlenden hochwertigen Recyclings aktuell nicht optimal genutzt werden. Im Rahmen des Projekts Graphit 2.0 wurde nun

ein Verfahrensweg, bestehend aus einer Kombination von mechanischer und thermischer Aufbereitung, zur Rückgewinnung von Kohlenstofffaser entwickelt.

Ergebnisse

Im Vorhaben konnte erfolgreich eine Containerlösung zur mechanischen Aufbereitung von CFK-Abfallstoffen mittels ClassiSizer-Zerkleinerungstechnologie der Firma Dieffenbacher konstruiert werden (Abb. 1). Durch den Einsatz der Prallzerkleinerung ist es möglich, eine große Bandbreite an Sekundärprodukten zu erzeugen. In Versuchen wurde der Einfluss verschiedener Prozessparameter, wie Füllgrad im Prallraum, Geschwindigkeit der Prallelemente, Dosierung etc., auf die Qualität der Kohlenstofffasern hin untersucht und ein umfangreiches Sicherheitskonzept erarbeitet.

Die Freilegung der im Kunststoff gebundenen Kohlenstofffasern erfolgte mit Hilfe von Mikrowellenpyrolyse am Fraunhofer ICT. Für die Anlage wurden ein Temperaturmesssystem entwickelt und anschließend Parameterstudien erstellt. Die genaue Kenntnis der Prozesstemperatur ist wichtig, um die Faser nicht durch zu hohe Temperaturen zu beschädigen, andererseits aber die erforderliche Temperatur für eine vollständige Entfernung der Kunststoffmatrix zu gewährleisten.

An der TH Nürnberg wurde die weitere Aufbereitung der Kohlenstofffasern zu Sekundärgraphit untersucht und dabei der Einfluss unterschiedlicher in den Mühlen auftretenden Beanspruchungsmechanismen identifiziert. Anhand von Untersuchungen der partikulären und morphologischen Eigenschaften, verglichen mit den Referenzmaterialien, wird die Herausforderung der Aufbereitungstechnik deutlich. Abbildung 2 zeigt Rasterelektronenmikroskopaufnahmen von Naturgraphit, synthetischem Graphit und pyrolysierten Kohlenstofffasern.

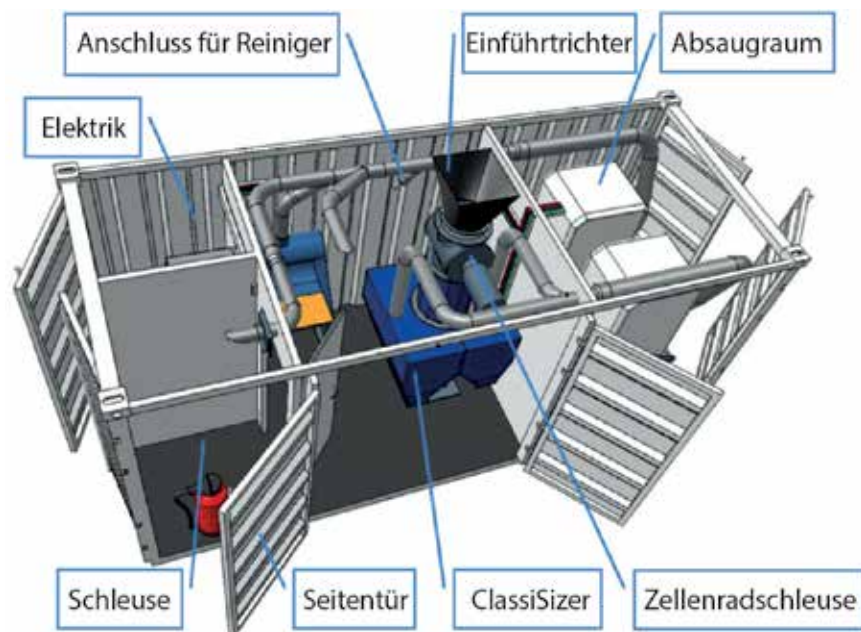


Abb. 1: Konzeptionierung einer Container-Aufbereitungslösung von CFK-Abfällen mittels ClassiSizer, Quelle: Dieffenbacher GmbH

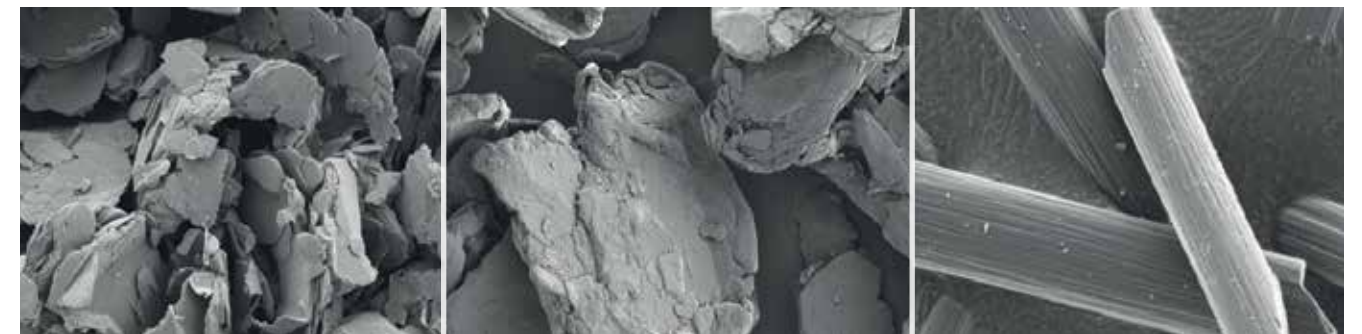


Abb. 2: REM Aufnahmen von Naturgraphit (links), synthetischem Graphit (Mitte) und Kohlenstofffaser (rechts), Quelle: Fraunhofer ICT

Erfolgreiche Anwendungen für recycelten Graphit

Es ist gelungen, natürliches und synthetisch erzeugtes Graphit in Energiespeichermedien (z.B. Bleiakkumulatoren/Autobatterie) durch Sekundärmaterialien zu ersetzen. Die zurückgewonnenen Kohlenstofffasern wurden hinsichtlich Ihrer Anwendung in Speichermedien untersucht (Abb. 3). In Zusammenarbeit des Fraunhofer ICT und der Firma Eisenhuth GmbH konnten Verfahrenswege aufgezeigt werden, die eine Nutzung in Bipolarplatten für Brennstoffzellen und Redox-Flow-Batterien ermöglichen. Die hergestellten Materialien wurden abschließend erfolgreich im Labor und in bauteilnaher Umgebung getestet (Abb. 4).



Abb. 3: Hergestellte Bipolarplatten aus Polypropylen-Kunststoff und Graphit bzw. Kohlenstofffaserpulver, Foto: Fraunhofer ICT

Ausblick

Basierend auf den bisherigen Ergebnissen, kann die Firma Dieffenbacher GmbH ein Zerkleinerungsaggregat, angepasst an kohlenstofffaserhaltige Abfälle, am Markt anzubieten. Auch die Firma Eisenhuth GmbH ist nun in der Lage Kohlenstoff-

faserabfälle als Sekundärgraphit für die Produktion von Bipolarplatten zu nutzen. Kommende Herausforderungen liegen im Aufbau von Verwertungsnetzwerken, um eine kontinuierliche Versorgung mit Sekundärmaterialien sicherzustellen – und darin, weitere Anwendungsmöglichkeiten zu identifizieren.



Abb. 4: Vanadium Redox-Flow-Batterie-Laborzelle für die Lade- und Entladezyklus-Tests, Foto: Fraunhofer ICT

Kontakt

Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
Wassertorstr. 10
90489 Nürnberg
Prof. Dr. Ulrich Teipel | Tel. +49 911 5880-1471
E-Mail: ulrich.teipel@th-nuernberg.de
Projektlaufzeit: 01.06.2015 – 31.05.2018
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 110

Lan-Tex

Rückgewinnung von Lanthan aus Rückständen der Raffineriekatalysatorherstellung für die Petrochemie mit Hilfe von Polyelektrolyt-ausgerüsteten Textilien



Seltene Erden aus industriellen Prozesswässern filtern

Die Entwicklung eines innovativen Adsorbentextils für die selektive Rückgewinnung von Lanthan aus Rückständen, die bei der Herstellung von sogenannten Crack-Katalysatoren (Fluid Catalytic Cracking, FCC) anfallen, war das Ziel des Forschungsvorhabens „Lan-Tex“. Wegen der wenig ausgeprägten Selektivität klassischer Metallrückgewinnungsverfahren, lohnte sich die Aufarbeitung dieser Lanthan-haltigen Prozesswässer der Erdölindustrie bisher nicht. Dieses sollte sich angesichts der wirtschaftlichen Bedeutung knapper Hochtechnologie-Rohstoffe nun ändern. Die Basis hierfür bilden Polyelektrolyte, die in der Lage sind, Seltene Erden gezielt aus den Abwasserteilströmen herauszufiltern. Derartige Materialien wurden über einfache Methoden der klassischen Ausrüstung an textilen Trägern dauerhaft fixiert und die Praxistauglichkeit der so entwickelten Filtertextilien in einer Pilotanlage anhand der realen Prozesswässer getestet.

Ergebnisse

Die Laboruntersuchungen des Deutschen Textilforschungszentrums Nord-West (DTNW) ergaben, dass sich eine kommerziell verfügbare Polyacrylsäure über einen zweistufigen thermischen Prozess in Gegenwart eines geeigneten Vernet-



Abb. 1: Industrielle Prozesswässer stellen eine wertvolle Sekundärrohstoffquelle dar. Dazu zählen neben Edelmetallen (Au, Pd, Ag) und Buntmetallen (Cu, Ni) auch Seltene Erden wie Lanthan (La). Foto: Klaus Opwis, DTNW, Krefeld



Abb. 2: Laborfiltrationsanlage zur Rückgewinnung von Lanthan mit Hilfe innovativer Adsorbentextilien. Foto: Klaus Opwis, DTNW, Krefeld

zers dauerhaft und waschbeständig an einem vom Textilhersteller Röders AG optimierten Polyesternadelfilz fixieren lässt. Das Up-Scale der Textilausrüstung in den industriellen Maßstab gelang beim Partner Roessing GmbH auf > 2 m Breite bei einer Warengeschwindigkeit von bis zu 6 m/min. Dabei werden Auflagen von 30 - 40 Gew.-% erzielt.

Untersuchungen beim Projektpartner Decker Verfahrenstechnik GmbH zeigten die Notwendigkeit einer vorgeschal-



Abb. 3: Einfache und kostengünstige Ausrüstung textiler Materialien mit metallbindenden Polyelektrolyten im industriellen Maßstab, Foto: Klaus Opwis, DTNW, Krefeld

teten Abtrennung von Aluminium aus dem Lanthan-haltigen Prozesswasser auf. Diese gelang durch eine behutsame pH-Wert-Erhöhung, bei der Al^{3+} -Verbindungen selektiv ausgefällt werden, während die La^{3+} -Ionen gelöst bleiben. Aus der verbleibenden Lösung ließ sich Lanthan mit Hilfe der innovativen Textilien vollständig entfernen. In Abhängigkeit von der Filtrationsgeschwindigkeit werden in einer Laborfiltersäule Lanthan-Beladungen von bis zu 100 mg La/g Textil erzielt. Außerdem wurden im Labormaßstab 18 Reaktionszyklen – bestehend aus Adsorption, Elution und Regeneration – ohne signifikanten Abfall der Adsorptionsleistung durchgeführt.

Zusammenfassend konnten aus wissenschaftlich-technischer Sicht alle wesentlichen Projektziele erreicht werden. Allerdings zeigen die Untersuchungen auch, dass das vorgeschlagene Konzept zum heutigen Zeitpunkt unter ökonomischen Gesichtspunkten noch nicht in der Praxis anwendbar ist. Dennoch hat das F&E-Vorhaben den Kenntnisstand hinsichtlich innovativer Strategien zur Rückgewinnung von Metallen im Allgemeinen und zur Nutzung textiler Materialien zur Adsorption Seltener Erden im Speziellen deutlich erhöht.

Ausblick

Die wirtschaftsstrategische Relevanz der Metalle der Seltenen Erden steht wegen ihres vorwiegenden Einsatzes im Hochtechnologiebereich außer Frage. So werden die Selte-

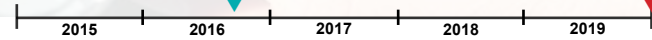
nen Erden etwa bei der Herstellung von Leuchtdioden und Elektronikartikeln, als Mischmetall zur Reinigung von Stahl sowie in Automobilkatalysatoren und Hochleistungsmagneten verwendet. Durch die erfolgreiche Ausweitung des hier gezeigten Konzepts könnten die innovativen Adsorbentextilien mittelfristig neben Lanthan auch für die Rückgewinnung weiterer strategischer Wert- bzw. Edelmetalle oder auch zur Entfernung von toxischen Schwermetallen aus Grund- und Oberflächenwässern genutzt werden. Die hier entwickelten Adsorbentextilien bilden somit insgesamt eine gänzlich neue Klasse technischer Textilien und können einen wesentlichen Beitrag zur Ressourceneffizienz im Sinne des „Urban Minings“ leisten.

Kontakt

Deutsches Textilforschungszentrum Nord-West gGmbH (DTNW)
Adlerstr. 1
47798 Krefeld
Dr. Klaus Opwis | Tel. +49 2151-843-2014
E-Mail: opwis@dtnw.de
Projektlaufzeit: 01.01.2015 - 30.06.2018
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 111

MetalSens

Entwicklung einer Prozesskette zur staubarmen Rückgewinnung von Technologiemetallen bestückter Leiterplatten mittels sensorgestützter Sortierung



Zielstellung

Neue und optimierte Recycling-Methoden sollen das Angebot an Technologiemetallen erhöhen. Partner aus Industrie und Forschung des Projekts MetalSens erarbeiten hierzu eine sensorgestützte und staubarme Prozesskette zur Rückgewinnung von Technologiemetallen aus Leiterplatten.

Im Rahmen des Projekts werden existierende Verfahren zielgerichtet für die Rückgewinnung von Technologiemetallen aus Elektronikschrott nutzbar gemacht.

Die Neuentwicklung von Sensorik unter Berücksichtigung der Anforderungen vor- und nachgelagerter Prozessschritte soll die Lücke zwischen Forschung und aktueller industrieller Anwendung schließen. Innovativ betrachtet MetalSens durchgängig den gesamten Recyclingprozess (Abb. 1) – die parameteroptimierte, zerstörungsarme und damit weniger Staub freisetzende Entstückung sowie die Neuentwicklung sortierfähiger Sensorik für geringe Bauteilgrößen bei hohen Abtastraten.

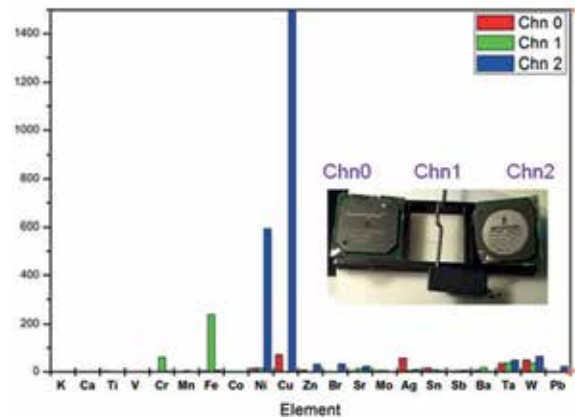
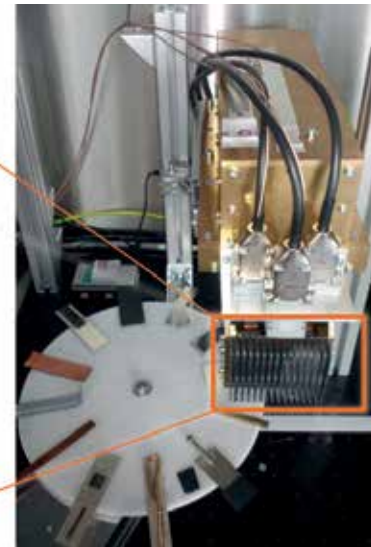


Abb. 2: Versuchsaufbau der Sensorik zur Erstellung der Fingerprints, Quelle: LLA



Ergebnisse

Zu Beginn des Projektes wurden wichtige Grundlagen der Einzeltechnologien innerhalb der Prozesskette erarbeitet, z.B. der Entstückung, Sortierung und Möglichkeiten zur metallurgischen Verwertung der Technologiemetalle. Aufgrund seiner Bedeutung wurde das Technologiemetall Tantal als Referenzmaterial ausgewählt.

Zunächst wurde die staub- und zerstörungsarme Entstückung der Leiterplatten genauer betrachtet, indem verschiedene

Entstückungsversuche mit einem Vertikal- sowie einem Einwellenshredder erfolgten. Mit dem Ergebnis, dass generell eine Siebgröße >10 mm anzustreben ist, da ansonsten der Feinanteil zu groß wird und die Integrität der Bauteile stark gefährdet ist.

Zur Erstellung von Fingerprints wurde ein neuer Sensor mit einer Röntgenröhre entwickelt. Der Ver-

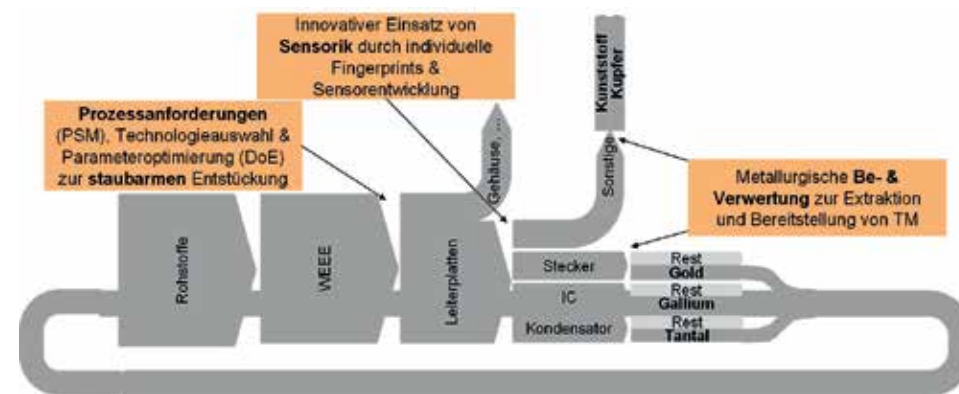


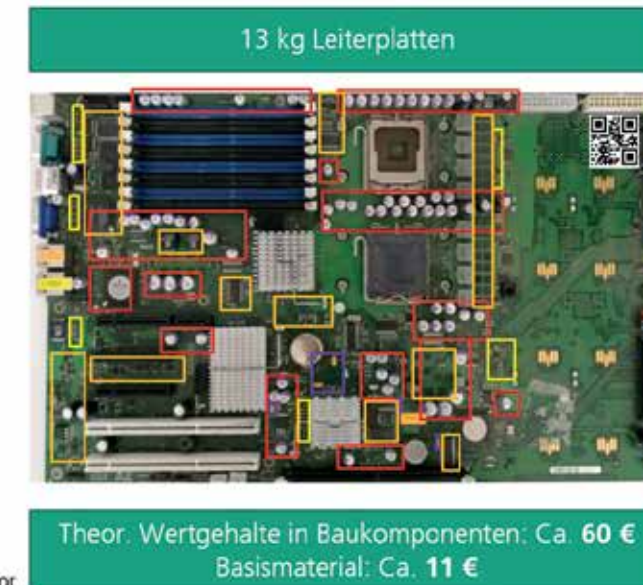
Abb. 1: Das Projekt MetalSens betrachtet durchgängig den gesamten Recyclingprozess, Quelle: IME/ IPT



Al Kondensatoren	
Al: 84 Gew. %	65 g 0,13 €
Si: 2 Gew. %	
Fe: 0,8 Gew. %	
Cu: 0,5 Gew. %	
C: 3,3 Gew. %	
Ag: 0,008 Gew. %	
Rest: Sonstige	

MLCC	
Ba: 44 Gew. %	43 g 45,45 €
Ni: 25 Gew. %	
Ti: 12 Gew. %	
Fe: 3,3 Gew. %	
C: 3 Gew. %	
Cu: 2,3 Gew. %	
Rest: Sonstige	

MLCC: Multi Layer Ceramic Capacitor
IC: Integrated Circuit
* Annahme - Cu-Gehalt als Basismaterial: 14 %



Ta Kondensatoren	
Ta: 27 Gew. %	69 g 6,7 €
Si: 25 Gew. %	
Mn: 7 Gew. %	
Cu: 6 Gew. %	
C: 3 Gew. %	
Ag: 1,75 Gew. %	
Au: 0,12 Gew. %	
Rest: Sonstige	

ICs	
Si: 27 Gew. %	98 g 6,4 €
Cu: 21 Gew. %	
Sn: 10 Gew. %	
Pb: 4,64 Gew. %	
C: 6 Gew. %	
Al: 1,6 Gew. %	
Ag: 0,3 Gew. %	
Rest: Sonstige	

Theor. Wertgehalte in Bauelementen: Ca. 60 €
Basismaterial: Ca. 11 €

Abb. 3: Theoretischer Wertgehalt von 13 kg Leiterplattenmaterial, Quelle: IPT

suchsaufbau ist exemplarisch in Abb. 2 dargestellt. Aufgrund des Rhenium-Targetmaterials der neuen Röhre, konnten Linienüberlagerungen im energiedispersiven Spektrum bei der Analyse von Tantal mit den charakteristischen Linien der Anregungsstrahlung vermieden werden. Tantal ist dennoch bisher nur schwierig detektierbar, hier sind bis Ende des Projekts noch weitere Tests erforderlich. Dies beeinflusst möglicherweise auch die Korngröße bei der Entstückung.

Zudem wurde ein mathematisches Modell erstellt, um die gesamte MetalSens-Prozesskette einer ökonomisch-ökologischen Bewertung zu unterziehen. Diesem Modell liegen etablierte Systematiken, z. B. LCA nach ISO 14040/44, zugrunde. Aufgrund starker Schwankungen einiger Prozessparameter wurde eine unsicherheitsgerechte Bewertung der Prozesskette im Modell integriert. Diese Unsicherheiten betreffen sowohl die Prozesskosten, als auch potenzielle Einnahmen durch die Wiederverwendung des recycelten Materials. Der theoretische Wertgehalt des Leiterplattenplatten-Materials ist beispielhaft in Abb. 3 dargestellt. Eine Validierung des Modells mit Realdaten kann erfolgen, sobald die Parameter der vorgelegten Prozesse festgelegt wurden.

Ausblick

In weiteren Versuchen müssen zunächst die Parameter für die staubarme Entstückung und die sensorbasierte Sortierung festgelegt werden. Ist dies erfolgt, gilt es mithilfe der metallur-

gischen Bewertung festzustellen, wie gut die Entstückung tatsächlich war, um anschließend die Prozesskette ökonomisch und ökologisch zu bewerten.

Für Folgeprojekte und -aktivitäten sollten insbesondere Digitalisierungskonzepte in Betracht gezogen werden, um die Rückgewinnungsquote von Technologiemetallen aus Elektronikschrott zu erhöhen. Sind beispielsweise Informationen über die Materialzusammensetzung der Leiterplatten bekannt (etwa über einen Digitalen Zwilling) könnte das Recycling und die Verfahrensauswahl zielgerichteter erfolgen. Zudem könnten veränderte regulatorische Rahmenbedingungen, wie ein Pfandsystem, die Rückgewinnungsquote steigern.

Kontakt

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
Steinbachstraße 17
52074 Aachen
Raphael Kiesel M.Sc. M.Sc. | Tel. +49 241 8904-158
E-Mail: raphael.kiesel@ipt.fraunhofer.de
Projektlaufzeit: 01.09.2016 – 31.12.2019
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 111

MinSEM

Konzept zur Rückgewinnung von Seltenerdelementen sowie Platingruppenmetallen aus mineralischen Aufbereitungs- und Produktionsrückständen



Zielstellung

Ein Teil des Projekts war die Rückgewinnung von Seltenerdelementen (Cer, Lanthan und anderen) aus Lanthan-haltigen optischen Flintgläsern hochwertiger Brillengläser. Daneben lag der Fokus auf den Platingruppenmetallen (PGM) in Schlacken des pyrometallurgischen Recyclings von Autoabgaskatalysatoren. Zudem sollte für diesen pyrometallurgischen Prozess die Aufkonzentration der PGM optimiert werden.

Ergebnisse

Verschiedene Wege wurden aufgezeigt, wie aus unterschiedlichen mineralischen Reststoffen strategische Rohstoffe, wie die Seltenerdelemente, sinnvoll zurückgewonnen werden können.

Besonders Seltenerdkonzentrate aus den Produktionsausschüssen optischer Gläser, die je nach Typ jeweils rund 6 bis 8 % an Lanthan, Erbium, Neodym und Praseodym enthalten, können langfristig zur Sicherung von wirtschaftsstrategischen Rohstoffen in Deutschland beitragen. Aufgrund der den Gläsern zugrundeliegenden stabilen borosilikatischen Matrix sind die Seltenerdmetalle nur schwer und mit sehr hoch konzentrierten Säuren in Lösung zu bringen.

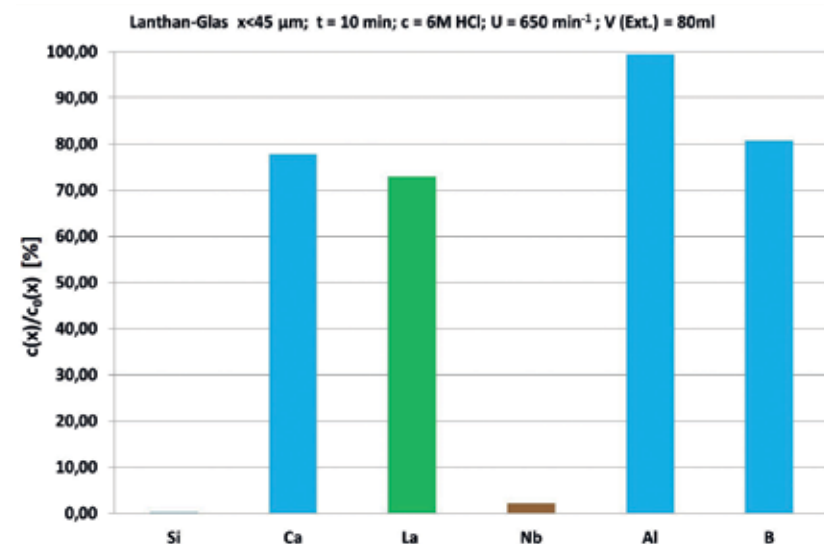


Abb. 1: Konzentration der Si, Ca, La, Nb, Al und B-Ionen in der Lösung nach mechanochemischem Leaching des Lanthanglas bei Raumtemperatur mit 6M Salzsäure (HCl). Die Konzentration ist in Prozent der Ausgangsmenge angegeben, Foto: Fraunhofer ISC-IWKS



Abb. 2: Darstellung der Verarbeitung von Fliesenkleber, Foto: Maleki GmbH

Mittels mechanochemischer Behandlung, konnten unter Einsatz von 6-molarer Salzsäure mit 72 % nahezu drei Viertel des in den optischen Gläsern vorliegenden Lanthans in der Lösung zurückgewonnen werden (Abb. 1). Nennenswerte Rückgewinnungsraten wurden bei optischen Gläsern auch für Erbium (55 %), Neodym (65 %) und Praseodym (64 %) erzielt.

Die Mechanochemie fasst dabei Prozesse der mechanischen und chemischen Aufbereitung zusammen. Hier führen intensive mechanische Beanspruchungen und Bruchvorgänge bei Zerkleinerungsprozessen in Verbindung mit erhöhten Drehzahlen zur mechanischen Aktivierung einzelner Partikel. Es entstehen räumliche und damit auch energetische Störungen des atomaren oder molekularen Gefüges, die sich wie folgt ausdrücken:

- Zunahme atomarer Fehlstellen; Gitterdeformationen
- Umorientierung von Bindungen aus Radikalen; Einbau von Gitterstörungen
- Phasenumwandlungen; Zunahme von Versetzungen

Die Störungen resultieren aus den im submikroskopischen Bereich herrschenden hohen Energiedichten. Diese führen dazu, dass bestimmte Phasenbestandteile sich besser in klassischen Mineralsäuren lösen lassen. Während des Zerkleinerungsvorgangs entstehen zwischen zwei gegeneinander kollidierenden Kugeln sehr hohe Temperaturen und Drücke, die lokal zu hydrothermalen Bedingungen führen können. Hinsichtlich der Löslichkeit einzelner Phasenbestandteile führt dies zu veränderten Reak-

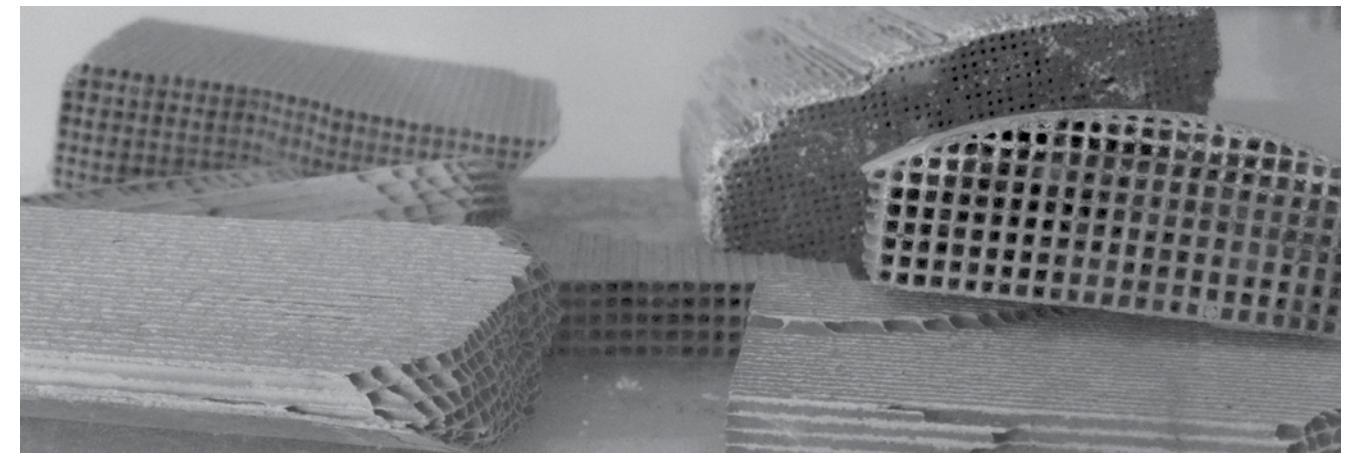


Abb. 3: Der keramische Wabenkörper aus aufgeschnittenen Fahrzeugkatalysatoren enthält große Mengen Edelmetall, Foto: Fraunhofer IWKS

tionsbedingungen, die zu einer Verbesserung des Löseverhaltens einzelner Komponenten führen. Der Prozess findet in Rührwerkskugelmøhlen bzw. Attritoren statt, die je nach Extraktionsmittel im Falle eines mechanochemischen „in situ“ Prozesses zwecks Schutz vor Korrosion in Stahl oder Keramik (z. B. ZrO_2) ausgelegt sind. Die für den Prozess notwendige Energie wird ausschließlich durch die Kollision der Kugeln erzeugt. Es muss daher keine zusätzliche Energie zur Erhöhung der Temperatur sowie zum Aufbau eines Druckes aufgewendet werden.

Zudem wurde der Plasmaschmelzprozess zur Rückgewinnung von Platingruppenmetallen aus Autokatalysatoren (Abb. 3) im Rahmen des Projekts verbessert. Durch die Steigerung der zugeschlagenen Menge an Eisen als Sammlermetall wurde eine Anreicherung der Platingruppenmetalle im Eisen erzielt. Im Maximum beträgt die Wiederfindungsrate der PGM im Sammlermetall über 99,8 %, gegenüber rund 95 % im bestehenden Prozess. Somit konnten die Verluste an PGM weiter minimiert werden.

Auch beim Wiedereinsatz der Katalysatorschlacke im bauchemischen Bereich wurde ein Durchbruch erzielt. Die positiven Ergebnisse zahlreicher Versuche zeigen eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit von Fliesenklebern (Abb. 2) durch den Zuschlag feingemahlener Katalysatorschlacke. Konkret konnte hier ein besseres Haftvermögen des Klebers bei einer verlängerten klebeffenen Zeit von 30 Minuten erzielt werden. Dadurch ist es möglich den Kleber über größere Strecken zu transportieren bzw. vor Ort länger zu verarbeiten. Die verbesserte Haftfähigkeit trägt dazu bei, auch an vertikalen Wänden größere und damit schwerere Fliesen zu setzen. Dies beschleunigt den Arbeitsprozess und lässt neue Möglichkei-

ten beim Design großer Flächen zu. Außerdem wurde hier, im Gegensatz zur Verbringung oder Deponierung, eine sinnvolle Nutzung der Schlacke als Sekundärrohstoff gefunden, die mit hohen positiven ökologischen und ökonomischen Auswirkungen verbunden ist.

Ausblick

Zur wirtschaftlichen Verwertung der Katalysatorschlacke in Fliesenkleber sind weiterführende bauchemische Untersuchungsreihen über längere Zeiträume erforderlich. Zudem sind noch administrative Rahmenbedingungen, wie die Einstufung des Materials nach REACH, sowie die Optimierung der Kostenstruktur für die mechanische Aufbereitung der Schlacke in den Feinbereich zu erfüllen.

Bezogen auf die Flintgläser: Mittels mechanochemischer Behandlung und anschließender Extraktion gebildete seltenerdhaltige Vorkonzentrate können zur weiteren Aufarbeitung zu einzelnen Seltenerdmetallen in bestehende Rückgewinnungsprozesse aus dem Primärbereich integriert werden.

Kontakt

Fraunhofer ISC – Institutsteil IWKS
Brentanostraße 2
63755 Alzenau
Dr. rer. nat. Gert Homm | Tel. +49 6023 32039-867
E-Mail: gert.homm@isc.fraunhofer.de
Projektlaufzeit: 01.06.2015 – 30.11.2018
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 112

REWITA

Recycling bergbaulicher Aufbereitungsrückstände zur Gewinnung wirtschaftsstrategischer Metalle am Beispiel der Tailings am Bollrich in Goslar

Zielstellung

In Bergeteichen abgelagerte Rückstände (Tailings) aus der Erzaufbereitung des früheren Erzbergwerks Rammelsberg im Harz enthalten wertvolle wirtschaftsstrategische Rohstoffe. REWITA untersuchte die Gewinnung von Indium, Gallium und Kobalt in Labor- und Technikumsversuchen. Unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gesichtspunkte wurden geeignete Abbaustrategien und -techniken, angepasste Aufbereitungsverfahren sowie Methoden zum Wiedereinbau der neu erzeugten Aufbereitungsrückstände entwickelt. Als Voraussetzung für die technische und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit, erfolgte zudem die Planung zur Infrastrukturgestaltung eines künftigen Rohstoffgewinnungsbetriebs, die Klärung von Genehmigungsfragen sowie eine wirtschaftliche und ökologische Gesamtbewertung.

Dabei ergaben sich zusätzliche Gewinnungsmöglichkeiten und Zielrohstoffe, mit dem wirtschaftsstrategischen Rohstoff Baryt sowie den Buntmetallen Kupfer, Zink und Blei.

Die aus zwei massiven Erzkörpern bestehende und in mehr als 1000 Jahren abgebaute Massivsulfidlagerstätte Ram-

28 m brachten eine feinkörnige bis siltige Mischung aus den Sulfidmineralen Pyrit (FeS_2), Chalkopyrit (CuFeS_2), Sphalerit (ZnS) und Galenit (PbS), diversen Tonmineralen, Karbonaten sowie Baryt (BaSO_4) ans Tageslicht. Mineralchemische Studien zeigen, dass die Hauptträgerminerale für die Spurenmetalle Indium und Kobalt die feinverwachsenen Sulfide Sphalerit, Chalkopyrit und Pyrit sind. Hierbei konnten für die untersuchten Bergeteiche u.a. Tonnagen bis zu 1.221 t Kobalt und 1.356.100 t Baryt ermittelt werden (Tab.1). Aufgrund des Einbaus von Gallium in silikatische Mineralphasen ist dessen wirtschaftliche Gewinnbarkeit nahezu ausgeschlossen und wurde somit im Projekt nicht weiter betrachtet.

Unter Verwendung von diversen verschalteten Flotationsverfahren und anschließenden Laugungsversuchen mit verschiedenen Lösemitteln und Säuren konnte gezeigt werden, dass aus dem Bergeteichmaterial wirtschaftsstrategische Rohstoffe und Konzentrate gewonnen werden können: 59 % Kobalt und 74 % Baryt (Abb.1) sowie, hinsichtlich der Massenrohstoffe, 74 % Kupfer, 72 % Zink und 65 % Blei. In den entwickelten Verfahrensrouten für die Flotation (Abb. 2) und der weiteren Aufbereitung durch

Tab. 1: Gehalte und Tonnage nach Schätzung für die Bergeteiche der Lagerstätte Rammelsberg

Rohstoff	Indium	Gallium	Kobalt	Zink	Blei	Eisen	Baryt	Kupfer
Gehalt	6 ppm	24 ppm	172 ppm	1,7 Gew. %	1,2 Gew. %	10 Gew. %	19,1 Gew. %	0,2 Gew. %
Tonnage	43	170	1 221	120 700	85 200	710 000	1 356 100	10 650

melsberg zählt geologisch zu den sedimentär-exhalativen (SEDEX) Lagerstätten und entstand vor rund 380 Millionen Jahren durch die Ablagerung von Sulfiderzen aus heißen metallführenden Fluiden am Meeresboden.

Ergebnisse

In einer aufwändigen Bohrkampagne wurde zunächst das abgelagerte Bergeteichmaterial repräsentativ beprobt (Abb.1) und analysiert. Zehn Bohrungen in Tiefen von 17 bis

Ammoniak-bzw. schwefelsaure Laugung, wird ein Großteil der Schwermetalle und des Sulfidschwefels aufkonzentriert und die Masse an Bergematerial maßgeblich reduziert. Aufgrund geringer Ausgangsgehalte im beprobten Bergeteichmaterial (Tab.1) wurde die mögliche Rückgewinnung von Indium durch ein Ionenaustauscherharz verworfen. Silikatische und carbonatische Bestandteile der Bergefraktion, geeignet als Baumaterial, konnten zu 93 % zurückgewonnen werden.

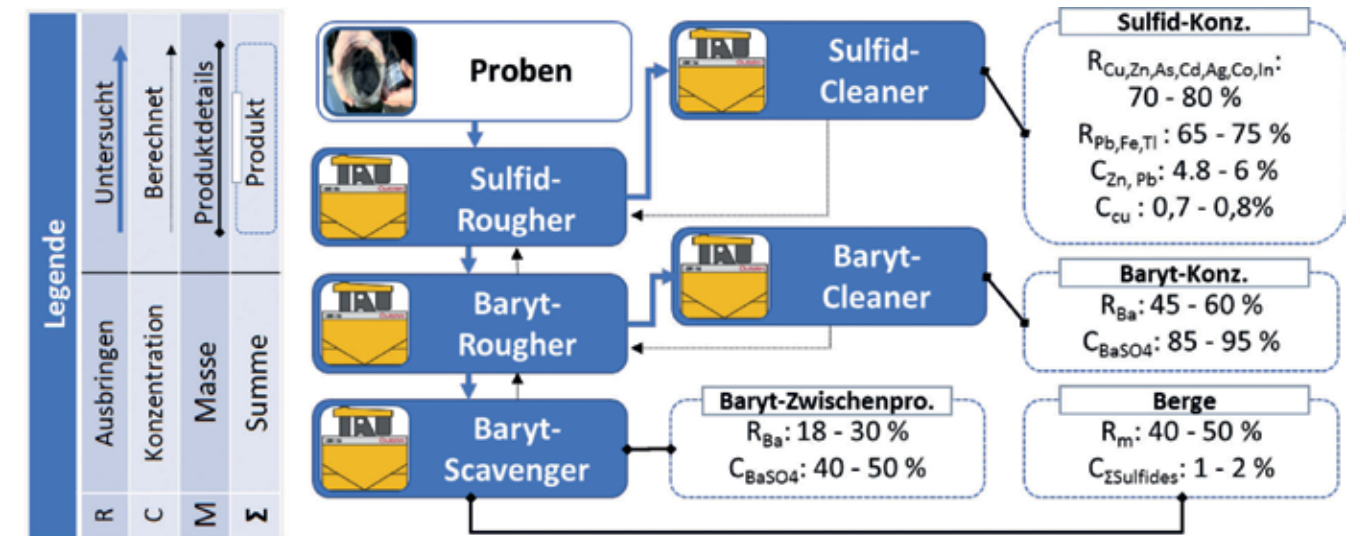


Abb. 1: Übersicht über die experimentellen Flotationsergebnisse für die Aufbereitung des Bollrich-Materials, Quelle: TU Clausthal IFAD

Durch ein Ausbringen von mehr als 82 Prozent der Schwermetalle und des sulfidischen Schwefels lassen sich Umwelt Risiken minimieren. Die an Schwermetallen reduzierte Bergefraktion macht nur noch 40-50 % der ursprünglichen Menge aus. Zur weiteren Aufbereitung der Flotationrückstände ist ein vielversprechendes und nachhaltiges Konzept entwickelt worden. Aus wirtschaftlicher Sicht, in Verbindung mit einer Weiterentwicklung der Rohstoffgewinnung aus Tailings, konnte die Wertschöpfung insgesamt verbessert werden.

Ausblick

Die entwickelten Aufbereitungsrouten für die Tailings des Rammelsbergs zeigen, dass neben den wirtschaftsstrategischen Metallen weitere Rohstoffe in den Fokus rücken, deren Nutzung sinnvoll erscheint. Verwendete Verfahren zur Gewinnung von Baryt- und Sulfid-Konzentraten weisen einen Rückstand von rund 65 – 70 % an Tonmineralen, 15 – 20 % Mischkarbonate, 3 – 8 % Baryt und jeweils < 0,5 % Pyrit, Galenit, Sphalerit und Chalkopyrit auf. Dieses Material ist potenziell einsetzbar in der Zementproduktion bzw. als Basis- und Oberflächenabdichtungsmaterial im Deponie-, Damm- und Deichbau. In einem Folgeprojekt ist zu untersuchen, ob der verbleibende Rückstand zu verwertbaren Mineralikfraktionen aufbereitet werden kann.



Abb. 2: Aufbau der Flotationszelle im Scale-Up, Foto: TU Clausthal IFAD

Kontakt

Technische Universität Clausthal
Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (IFAD)
Walther-Nernst-Str. 9
38678 Clausthal-Zellerfeld
Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann | Tel. +49 5323 72-2038
E-Mail: goldmann@aufbereitung.tu-clausthal.de
Projektlaufzeit: 01.05.2015 – 31.12.2018
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 114

SESAM

Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus Flugaschen der Müllverbrennung

Zielstellung

Der Sekundärrohstoffgehalt von Flugaschen der thermischen Abfallverwertung in Deutschland und vor allem dessen saisonale Schwankungen waren bisher weitgehend unbekannt. Abgeschätzt aus der Abfallmenge, handelt es sich dabei um einen Stoffstrom von ca. 380.000 t/a. In Kooperation mit der Müllverwertungsanlage (MVA) Ingolstadt wurde der Gehalt an Elementen in den dort anfallenden Flugaschen umfassend und zeitlich hoch aufgelöst analysiert. Zusätzlich wurden als Vergleich weitere fünf MVAs mit unterschiedlichen Abgasreinigungstechniken beprobt.

In der MVA Ingolstadt werden mit dem sauren Waschwasser aus der Rauchgasreinigung Wertmetalle aus der Flugasche ausgewaschen (FLUWA Verfahren). Ein Ziel des Projekts war es, durch polymergestützte Ultrafiltration (PAUF) diese



Abb. 1: Pilotanlage für die kontinuierliche Membran-Ultrafiltration. Farbe des Retenats bei zunehmender Anreicherung von Kupfer aus Flugascheextrakt, Foto: TU München

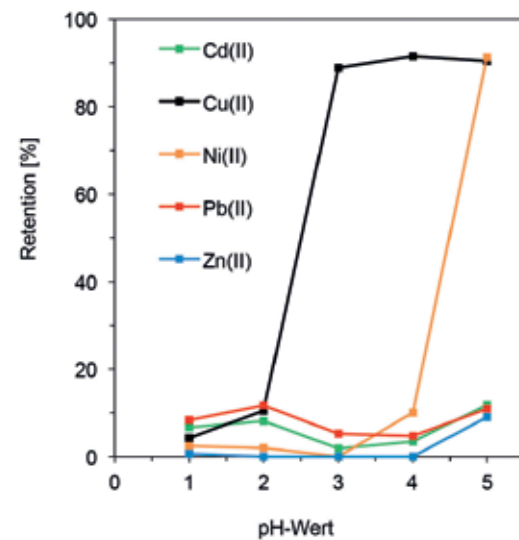


Abb. 2: Anwendung der polymergestützten Ultrafiltration auf ein FLUWA-Filtrat der MVA Ingolstadt. Gezeigt ist die pH-abhängige Retention von Cd(II), Cu(II), Ni(II), Pb(II) und Zn(II) durch ein wasserlösliches Polymer, Quelle: TU München

aus dem FLUWA-Filtrat selektiv abzutrennen (Abb. 1). Bei der PAUF werden Metallionen durch wasserlösliche Polymere selektiv gebunden und können dadurch hinter einer Membran zurückgehalten werden, während Störstoffe die Membran passieren. Durch Veränderung des pH-Werts können die gebundenen Wertmetalle später wieder von den Polymeren gelöst werden (Abb. 2).

Ergebnisse

Es konnte gezeigt werden, dass die Konzentrationen der Elemente in der Flugasche der MVA Ingolstadt sowohl im Tages- als auch im Monats- und Jahresverlauf bis auf wenige Ausnahmen um maximal 40% schwankten (Abb. 3). Die Zusammensetzung der Flugaschen aus den fünf weiteren Verbrennungsanlagen war mit der der MVA Ingolstadt vergleichbar.

Die Analyse des Rohstoffpotenzials der Flugaschen zeigte, dass diese hohe Anteile an Zink (9-39 g/kg), Blei (1-13 g/kg),

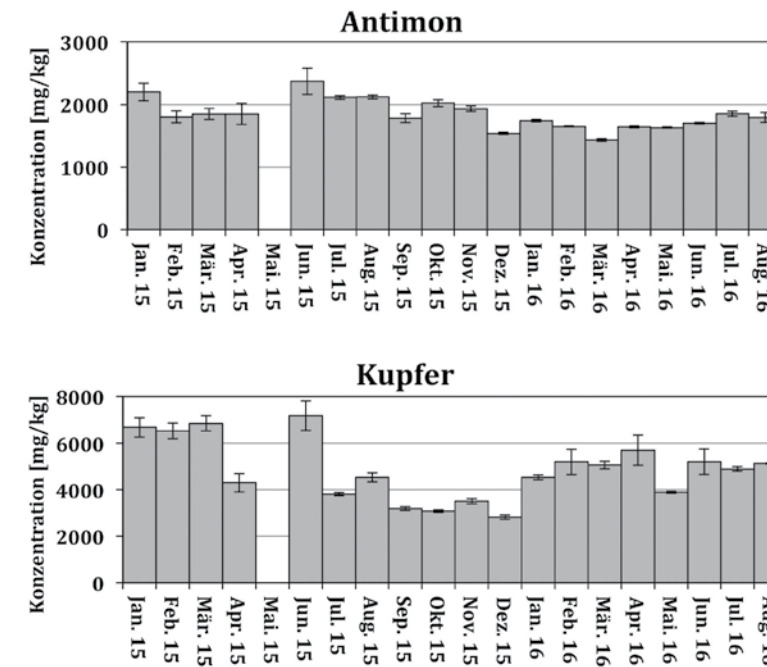


Abb. 3: Zeitliche Schwankungen der Elementgehalte in der Flugasche der MVA Ingolstadt von Januar 2015 bis August 2016 am Beispiel von Antimon und Kupfer, Quelle: Bundesanstalt für Gewässerkunde

Kupfer (0,5-7,2 g/kg), Zinn (0,3-2,1 g/kg) und Antimon (0,8-2,5 g/kg) aufweisen. Versorgungskritische Elemente wie Seltenerden (z.B. Cer 10-38 mg/kg, Lanthan 7-24 mg/kg), Gallium (5-13 mg/kg), Wolfram (8-69 mg/kg) und Kobalt (15-77 mg/kg) sind im mg/kg Bereich enthalten. Insgesamt wurden 67 Elemente in den Flugaschen bestimmt.

Zink (1,3-3,3 g/L) und Blei (0,2-0,8 g/L) sind in relevanten Konzentrationen im FLUWA-Filtrat enthalten – Zinn, Antimon, und andere versorgungskritische Elemente werden dagegen nicht nennenswert mobilisiert. Da für Zink und Blei etablierte Abtrennverfahren existieren, wurde die PAUF für die Abtrennung von Kupfer (11-148 mg/L) optimiert.

Als Ergebnis eines umfangreichen Polymerscreenings für die PAUF wurden wasserlösliche Polymere identifiziert, die die hohe Salzkonzentration des FLUWA-Filtrats (z.B. Chlorid 30-70 g/L, Natrium 10-33 g/L, Kalzium 1-9 g/L) tolerieren und gleichzeitig selektiv Wertmetalle binden. Es wurden Polymere gefunden, die sich u.a. hervorragend für die selektive Anreicherung und Abtrennung von Kupfer aus FLUWA-Filtrat eignen (Abb. 2). Die Komplexverbindungen aus

diesen Polymeren und Kupfer absorbieren Licht im sichtbaren Bereich, was eine photometrische Steuerung der Anreicherung ermöglicht (Abb. 1). Die in den Laborversuchen erzielte Selektivität der Kupferabtrennung konnte im Pilotmaßstab bestätigt werden.

Ausblick

Die abschließende ganzheitliche Bilanzierung des Verfahrens zeigte, dass sich die PAUF für die Rückgewinnung von Rohstoffen aus Flugaschen aufgrund der geringen Freisetzung versorgungskritischer Elemente derzeit nicht wirtschaftlich in den FLUWA-Prozess integrieren lässt. Zur Nutzung des durchaus interessanten Sekundärrohstoffpotenzials von Flugaschen der Müllverbrennung müssen daher deutlich effektivere Mobilisierungsverfahren entwickelt werden. Die PAUF hat sich jedoch als neues, hochselektives Anreicherungsverfahren bewährt und kann in anderen Bereichen eingesetzt werden – wie der Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen

aus Prozessabwässern, beispielsweise in der Galvanik. Hierbei würde neben der Rückführung von Rohstoffen eine Entgiftung Behandlungspflichtiger Abwässer als Mehrwert generiert. Die erfolgte umfassende Untersuchung der Flugaschen sowie der Mobilisierbarkeit wirtschaftsstrategischer Rohstoffe liefert zusätzlich eine solide Datenbasis, die für die Entwicklung anderer Verfahren genutzt werden kann.

Kontakt

Technische Universität München
Department Chemie – Fachgebiet Analytische Chemie
Lichtenbergstraße 4
85748 Garching bei München
Prof. Dr. Michael Schuster | Tel. +49 89 289-13763
E-Mail: michael.schuster@tum.de
Projektlaufzeit: 01.01.2015 – 30.06.2018
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 117

Theisenschlamm

Gewinnung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe aus Stäuben der Kupferherstellung



Selektive Aufbereitung erfolgreich entwickelt

Zahlreiche strategisch wichtige Metalle sind mit dem Flugstaub der ehemaligen Kupferschiefer-Verhüttung in der Region Mansfeld deponiert worden. Das Theisenschlamm-Projekt entwickelte erfolgreich selektive Aufbereitungsverfahren für die enthaltenen, teils seltenen Metalle. Neben hohen Zink- und Blei-Gehalten enthält der Theisenschlamm auch strategische Elemente wie Rhenium, Germanium, Cobalt, Molybdän und Silber. Aus rohstofftechnischer Sicht ist die Gewinnung dieser Elemente von besonderem Interesse, da sie für die Herstellung einer Vielzahl technologischer Produkte ein wesentliches Ausgangsmaterial darstellen. Die nachhaltige Verwertung dieses Materials würde zudem einen Beitrag zur Verbesserung der Umweltsituation im Umfeld der Theisenschlamm-Halde leisten.

Komplexe Matrix

Primär war die Gewinnung eines möglichst großen Spektrums an Wertelementen aus der komplexen Matrix des Theisenschlammes mit einem energieeffizienten,



Abb. 2: Kontinuierliche mehrstufige Solventextraktionsanlage, Foto: Helmholtz-Institut Freiberg

umweltfreundlichen und wirtschaftlichen Verfahren angestrebt. Die Vielzahl der zu betrachtenden Elemente, deren große Konzentrationsunterschiede und die komplexe Matrix

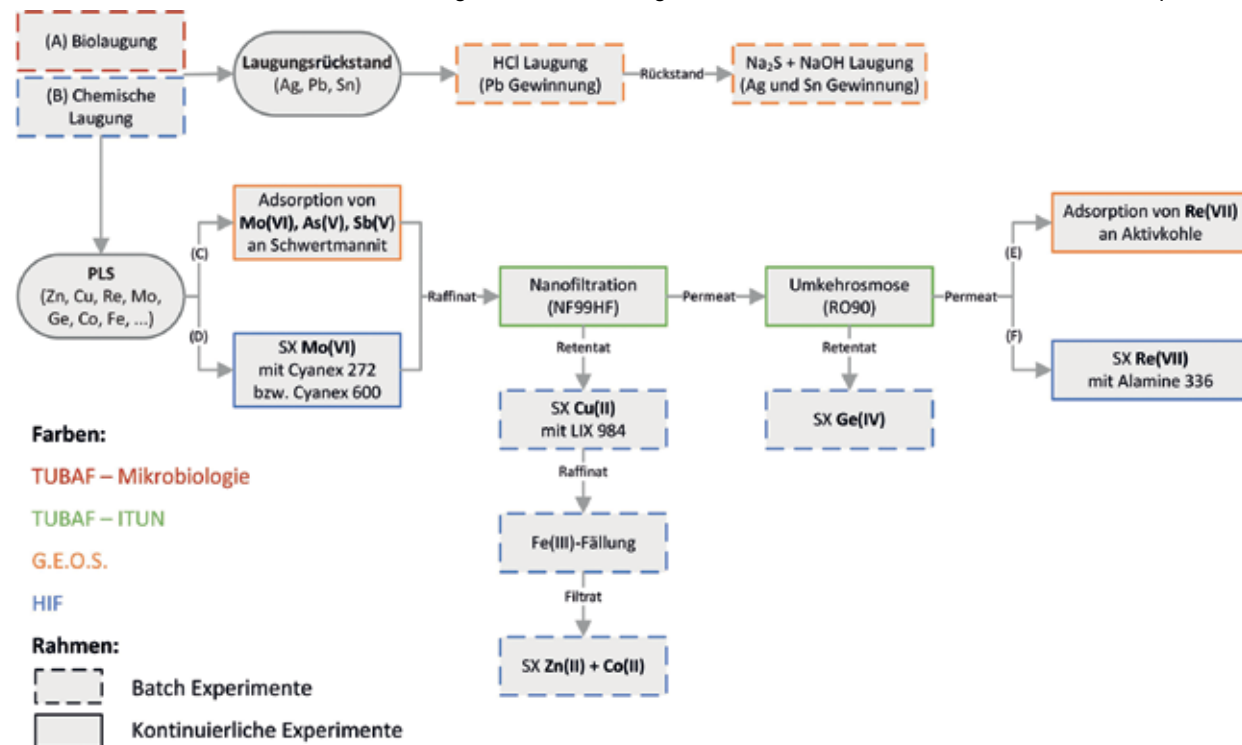


Abb. 1: Vorgeschlagene Verfahrenskombination für die Aufarbeitung des Theisenschlammes, Quelle: Helmholtz-Institut Freiberg



Abb. 3: Kontinuierliche Membranfiltrationsanlage, Foto: TUBAF-ITUN

des Theisenschlammes stellen eine erhebliche Herausforderung für die Verfahrensentwicklung dar. Die so gewonnenen Erkenntnisse und entwickelten Prozesse ermöglichen dadurch aber eine breitere Anwendbarkeit auf andere sulfidische Materialien, auch solche mit geringerer Komplexität.

In den Teilprojekten des Vorhabens Theisenschlamm wurde eine Fülle jeweils relevanter Ergebnisse zum Theisenschlamm selbst, zu seiner Charakteristik, den für die Wertstoffgewinnung wesentlichen Teilprozessen und der für eine Umsetzung notwendigen Randbedingungen erzielt. Aufgrund der geringen Partikelgröße des Theisenschlammes ist bereits eine gute Voraussetzung für einen Laugungsprozess gegeben, da keine zusätzliche Aufbereitung des Materials notwendig ist.

Ergebnisse

Aus der Kombination der erzielten Ergebnisse konnte ein auf Hydrometallurgie beruhendes hybrides Gesamtverfahren zur selektiven Gewinnung wirtschaftsstrategischer Spurenelemente aus Theisenschlamm abgeleitet werden (Abb. 1). Die Prozesskette setzt sich aus optimierten Membranfiltrations- (Abb. 3) und Solventextraktions-Prozessen (Abb. 2) sowie der Adsorption an Schwertmannit und Aktivkohle zusammen. Diese neuartige Verfahrenskombination ermöglicht es beispielsweise, die strategischen Elemente Rhenium, Molybdän oder Germanium aus einer Lösung abzutrennen, in der Zink um das 1000-fache höher konzentriert vorliegt. Zusätzlich wurden die Zielelemente durch diese Prozessschritte erfolgreich angereichert, was insbesondere für die Herstellung marktfähiger Produkte oder verwertbarer Zwischenprodukte einen essentiell notwendigen Verfahrensschritt darstellt.

Um die Stoffkreisläufe zu schließen, beinhaltet das Verfahrenskonzept ebenso eine Aufarbeitung des Rückstands der Theisenschlamm-Laugung. Zwei nachgeschaltete Laugungsprozesse ermöglichen so die Gewinnung weiterer Elemente, wie Blei, Silber und Zinn. Darüber hinaus kann damit die Umweltbelastung durch den finalen Rückstand auf ein Minimum gesenkt werden. Mithilfe der Wirtschaftlichkeitsanalyse für ausgewählte Verfahrenskombinationen der selektiven Laugung, der selektiven Anreicherung von Wertelementen und der Aufarbeitung der Laugungsrückstände wurden kritische Optimierungsparameter ermittelt, die – neben den aktuell niedrigen Rohstoffpreisen – einer Wirtschaftlichkeit noch im Wege stehen. Möglichkeiten zur Verbesserung der Teilprozesse, z. B. hinsichtlich der Selektivität oder der Ausbeuten, wurden vorgeschlagen.

Ausblick

Die erarbeiteten Verfahrenskombinationen zeigen technologische Möglichkeiten zur hydrometallurgischen Aufarbeitung des Theisenschlammes auf. Sie zeigen darüber hinaus auch Wege zur Portierung der Verfahren für die zukünftige Verarbeitung anderer komplexer Rohstoffe und der damit verbundenen selektiven Extraktions- und Anreicherungsprozesse.

Kontakt

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ
 Department Analytik
 Permoserstrasse 15
 04318 Leipzig
 Prof. Dr. Thorsten Reemtsma | Tel. +49 341 235 1261
 E-Mail: thorsten.reemtsma@ufz.de
 Projektlaufzeit: 01.02.2015 – 31.07.2018
 Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 117

TransTech

Entwicklung transformativer Laugungstechnologien zur Steigerung der Ressourcenausbeute von Li, Co und Ag führenden Rohstoffen



Zielstellung

Können transformative Technologien, wie Mikrowellen, Ultraschall oder Plasma, die Metallausbeute bei Laugungsverfahren erhöhen? TransTech untersuchte deren Einfluss auf die Wasser- und Säurebehandlung, als ökonomischen sowie ökologischen Ansatz für eine nachhaltigere Hydrometallurgie. Denn eine Ausbeutesteigerung ermöglicht die Nutzung von Reststoffen mit einem geringen Wertmetallgehalt, deren Verwertung unter ökonomischen Gesichtspunkten bisher keine Rolle spielte.

Ergebnisse

Vergleichend sind die transformativen Technologien Mikrowelle, Plasma und Ultraschall an drei verschiedenen Ausgangsmaterialien getestet worden: an Schlacken aus dem Lithium-Batterie-Recycling, der primären Kupfergewinnung



Abb. 1: Plasmaanlage für die Aktivierung wässriger Medien, Foto: Jil Schosseler

und dem Recycling silberhaltiger Reststoffe. Zunächst wurden für alle Materialien und Technologien Referenzversuche erarbeitet, die eine vergleichende Betrachtung der Versuche untereinander erlauben. Anschließend Aktivierungsversuche zeigten, dass für die Materialien die Metallausbeute, abhängig von der verwendeten Technologie, variiert.

Unter Verwendung von Mikrowellen konnte nur bei einer silberhaltigen Schlacke die Kupferausbringung signifikant erhöht werden. Auch das Integrieren mikrowellenbehandelter Medien in den Laugungsprozess gestaltet sich schwierig, da das wässrige Medium sich stark erhitzt und folglich die festgelegte Laugungstemperatur schnell übersteigen kann, was eine stabile Prozessfahrweise erschwert.



Abb. 2: Tischmessinstrument zur Parameterüberwachung der aktivierten wässrigen Medien, Foto: Claudia Schier

Die Versuche mit Ultraschall zeigen für alle Materialien eine Verbesserung der Metallausbeute, wobei diese nur wenige Prozent beträgt. Der Effekt von Ultraschall auf das Laugungsmedium beruht auf der Bildung von Wasserstoffperoxid, welches durch sein hohes Standardpotenzial als Oxidationsmittel fungiert. Ein qualitativer Nachweis von Wasserstoffperoxid konnte mittels UV/Vis-Spektroskopie erfolgen. Doch auch eine Optimierung der Versuchsreihe mit Ultraschall ist aufgrund der starken Erhitzung des Laugungsmediums während der Behandlung nur bedingt möglich.

Bei der Plasmabehandlung wird plasmaaktiviertes Gas in die wässrige Phase eingeleitet. Dadurch können Ozon und

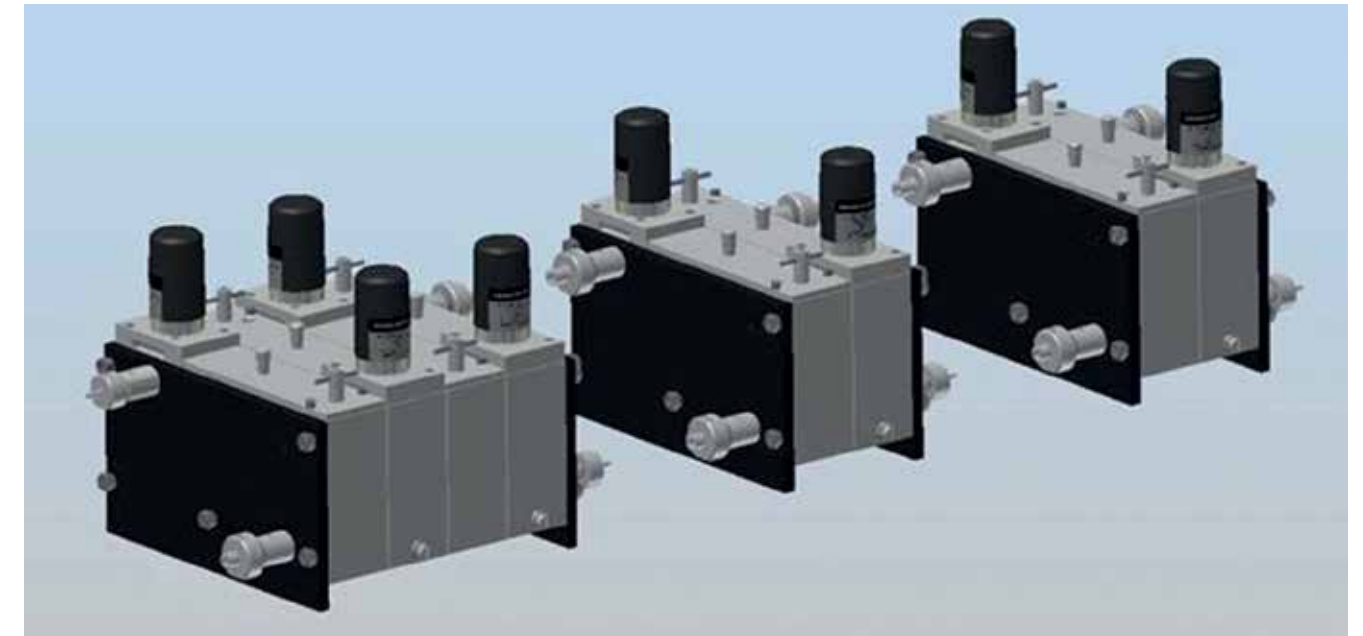


Abb. 3: Mixer-Settler-Anlage zur Abtrennung von Verunreinigungen und Rückgewinnung des Zielmetalls, Quelle: Frank Diekmann

andere reaktive Spezies (wie Radikale oder reaktive Moleküle) während der Laugung die Kinetik erhöhen. Im Rahmen der Plasmaversuche wurden unterschiedliche Parameter, wie das Prozessgas (Stickstoff/Druckluft), das behandelte Medium (Wasser/Säure) sowie die Behandlungsdauer variiert, wobei die Behandlung mit Säure unter Stickstoff als Prozessgas die besten Ergebnisse erzielte. Eine signifikante Steigerung der Ausbeute konnte jedoch auch bei der Plasmatechnologie nicht erzielt werden.

Aufgrund des innovativen Ansatzes der Plasmabehandlung in der Hydrometallurgie und des größten Forschungspotenzials, konnte mit der Versuchsreihe jedoch noch nicht das volle Potenzial der Plasmatechnologie ausgeschöpft werden. Optimierungsversuche zur Plasmabehandlung berücksichtigen erweiterte Einflussparameter und eine längere Behandlungsdauer. Zur quantitativen Untersuchung der Forschungsergebnisse werden Änderungen des pH-Wertes, der Leitfähigkeit sowie des gelösten Sauerstoffs vor und nach der Plasmabehandlung aufgenommen. Die in den Versuchen generierte Lösung wird anschließend in einer Mixer-Settler-Anlage zur Abtrennung des Kobalts – einem Hauptbestandteil der Lithium-Ionen-Batterien – weiter aufbereitet.

Ausblick

Hinsichtlich der erzielten Ausbeutesteigerung sowie der Innovationskraft der Technologie wird der Plasmatechnologie das höchste Potenzial zur künftigen Implementierung in industrielle hydrometallurgische Prozesse beigemessen. Die wirtschaftliche Anschlussfähigkeit des Projekts ergibt sich insbesondere durch die Eignung des Verfahrens für verschiedene mineralische Rohstoffe, die in hydrometallurgischen Prozessen verarbeitet werden. Hierbei ist jedoch die Übertragbarkeit vorhandener Versuchsergebnisse in einen größeren Maßstab zu validieren.

Kontakt

RWTH Aachen University, IME
Intzestraße 3
52056 Aachen
Prof. Bernd Friedrich | Tel. +49 241 80-95850
E-Mail: bfriedrich@ime-aachen.de
Projektlaufzeit: 01.04.2016 – 31.12.2019
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 118

VAFLOW

Einsatz eines Vanadiumelektrolyts auf Basis von Sekundärrohstoffen in Redox-Flow-Batteriespeichersystemen

Zielstellung

Die Energieversorgung der Zukunft braucht leistungsfähige Speichersysteme, die auf spezifische wirtschaftsstrategische Rohstoffe angewiesen sind. Im Fall der Redox-Flow-Batteriespeicher ist dies das Metall Vanadium für den Elektrolyten, in dem die Energie chemisch gespeichert wird. Das VAFLOW-Projektteam hat ein Konzept entwickelt, um einen vanadiumhaltigen Reststoff für eine neue Anwendung aufzubereiten und der Batterieindustrie zur Verfügung zu stellen.

Damit leistet das Vorhaben einen Beitrag sowohl für nachhaltige Energieinfrastrukturen als auch für die Kreislaufwirtschaft. Das hydrometallurgische Verfahren ist dabei auf einen innerhalb des Projekts konkretisierten spezifischen Reststoff mit geringem Vanadiumgehalt optimiert (Abb. 1). Dabei hat das Projektteam die gesamte Wertschöpfungskette betrachtet: beginnend mit der Identifizierung und Charakterisierung relevanter Reststoffströme, über die metallurgische Verfahrenstechnik bis hin zu Tests in einem Batterielabor.



Abb. 1: Einsatzmaterial für Recyclingprozess, Foto: Fraunhofer UMSICHT

Ergebnisse

Im Rahmen des Projekts konnte ein mehrstufiges hydrometallurgisches Verfahren zur Gewinnung von Vanadium aus einem bisher nicht zur Vanadiumrückgewinnung genutzten industriellen Nebenprodukt entwickelt werden. Das Ver-



Abb. 2: Laboraufbau Solventextraktion, Foto: TU Bergakademie Freiberg

fahren wurde so optimiert, dass sowohl ein direktes Elektrolytvorprodukt zur Batteriespeicherung als Prozessoutput gewählt werden kann als auch ein typischer Rohstoff für weitere industrielle Anwendungen. Das Extraktionsverfahren ist nach aktuellem Stand der Arbeiten zweistufig. Im ersten Trennschritt kann zudem gezielt Titan aus der Lösung entfernt und zurückgewonnen werden. Im zweiten Schritt wird Vanadium von den enthaltenen Störelementen, wobei Eisen die Hauptrolle spielt, mittels speziell auf die Trennung eingestellten Bedingungen und Extraktionsmitteln durch Solventextraktion abgetrennt (Abb. 2). Das im Ausgangsstoff

enthaltene Vanadium kann so von Störelementen isoliert, zu 91 % gewonnen und im Anschluss aufkonzentriert werden (Abb. 3).



Abb. 3: Vanadiumhaltiger Rückstand aus hydrometallurgischem Verfahren, Foto: TU Bergakademie Freiberg

Neben den hydrometallurgischen Versuchen errichtete Fraunhofer UMSICHT mehrere Teststände mit unterschiedlichen Zellgrößen zur Elektrolytcharakterisierung (Abb. 4). Ergänzt werden diese Versuchsstände durch einen Aufbau zur Bestimmung des Kapazitätsverlusts des Elektrolyten bei unterschiedlicher Zyklenzahl mittels potentiometrischer Titration.

Der Prozess konnte dabei auf Grundlage einer parallel verlaufenden ökobilanziellen Nachhaltigkeitsbewertung weiter optimiert werden. Im Rahmen einer Geschäftsmodellentwicklung wurden insbesondere ein relevantes Anwendungspotenzial für den europäischen Batteriespeichermarkt identifiziert und erste Szenarien zur Standortfindung entwickelt.

Ausblick

Die industrielle Umsetzung der Verfahrensentwicklung soll weitergeführt werden. Das Potenzial zur Vanadiumgewinnung aus bisher nicht betrachteten Reststoffen und die verfahrenstechnische Lösung zur Herstellung eines Elektrolyten sowie eines Vanadiumrohstoffs ist vorhanden. Das Verfahren muss nun über den Schritt einer Technikumsanlage in die Industrie skaliert werden. Hierzu sind unter anderem gesonderte Standortanalysen notwendig, die die Besonderheiten des entwickelten Prozessschemas berücksichtigen. Ebenso sind in einem Folgeprojekt noch An-

sätze einer Kreislaufführung von eingesetzten Reagenzien zu überprüfen. Im Projekt konnten zusätzlich relevante Nebenprodukte aus dem entwickelten Prozess identifiziert werden, deren mögliche Vermarktung die Elektrolytherstellung effizienter und kostengünstiger machen kann und das Ressourceneffizienzpotenzial noch einmal steigert. Zukünftiger Forschungsbedarf liegt in der Beantwortung der Fragestellung, wie tolerant Batteriesysteme langfristig gegenüber Störstoffen sind und welche Reinheitsgrade zwingend notwendig für einen störungsfreien Betrieb sind. Langzeituntersuchungen liegen hierzu noch nicht in belastbarer Größenordnung vor.



Abb. 4: Blick in die Redox-Flow-Testzelle, Foto: Fraunhofer UMSICHT

Kontakt

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT
Osterfelder Str. 3
46047 Oberhausen
Jochen Nühlen | Tel. +49 208 8598-1370
E-Mail: jochen.nuehlen@umsicht.fraunhofer.de
Projektlaufzeit: 01.05.2016 – 31.10.2019
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 119





r⁴-Verbundprojekte

Kreislaufführung von Altprodukten



► AddResources

► AgREE

► DIBRAS

► gagenda+

► MExEM

► NeW-Bat

► SEMAREC



AddResources

Rückgewinnung und Wiedereinsatz von Antimontrioxid und Titandioxid aus Kunststofffraktionen der Elektroaltgeräteverwertung



Flammgeschützte Kunststoff-Abfälle als gehaltvolle Rohstoffquelle

Sowohl Antimon als auch Titan zählen zu den versorgungskritischen Metallen und sind in Additiven für Kunststoffgehäuse von Elektrogeräten enthalten: Antimontrioxid als Flammenschutzmittel, Titandioxid als Weißpigment. Das Projekt AddResources konnte zeigen, dass sich diese Kunststoffgehäuse (Abb. 1) als Rohstoffquelle für Antimon und Titan nutzen lassen – hochwertige Sekundärrohstoffe, welche sich zurückgewonnen für den Wiedereinsatz in neuen Produkten eignen.



Abb. 1: Bildschirm-Altgeräte bei einem Recyclingunternehmen, Foto: Fraunhofer IVV

Forscher des Fraunhofer Instituts für Verfahrenstechnik und Verpackung verwendeten im Projekt zur Rückgewinnung den CreaSolv® Prozess, ein lösemittelbasiertes Verfahren, das die Gehäusekunststoffe auflöst und nach Aufreinigung zu hochwertigen Kunststoffrecyclaten verarbeitet. In der Reinigungsstufe wurden die beiden kritischen Metalle mit Dekanterzentrifugen des assoziierten Partners Flottweg



Abb. 2: Test des FlammSchutzmittels: Kunststoffolie additiviert mit Antimontrioxid. In der Kantenbeflammung zeigt sich eine bessere Schutzwirkung durch das wiedergewonnene Antimontrioxid (rechts) im Vergleich zur Neuware (links), Fotos: Fraunhofer IVV

SE aus der Kunststofflösung abgetrennt und nach weiterer Aufbereitung zu Sekundäradditiven verarbeitet. Diese wurden im Anschluss vom Additiv- und Masterbatchlieferanten ARGUS Additive Plastics GmbH in einer flammhemmenden Kunststoff-Folie verarbeitet. Der assoziierte Partner UVE GmbH übernahm die Öffentlichkeitsarbeit sowie die Vernetzung der Technologie-Partner mit Vertretern der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger.

Ergebnisse

Ein wichtiges Ergebnis des AddResources Projekts ist, dass sich partikuläre Additive im unteren Mikrometerbereich mithilfe der Zentrifugalkraft effektiv aus Polymerlösungen abtrennen lassen und sich sowohl Antimontrioxid und Titandioxid im Polymerrecyclat reduzieren als auch stofflich

rezyklieren lassen. Ein weiteres wichtiges Ergebnis besteht darin, dass sich aus den abgetrennten Partikeln Additivkonzentrate herstellen lassen, die sich als Polymeradditiv eignen. Sie erreichen die Spezifikationen hinsichtlich der Partikelgröße und können Antimontrioxidneuware zu 100 % substituieren. Aktuelle Flammprüfungen nach DIN 4102 B2 (Kantenbeflammung) belegen, dass die Sekundäradditive keine Wirkungseinbußen zeigen (Abb. 2).

Forschung für die Zukunft

Damit ist der technische Nachweis gelungen, dass flammgeschützte Gehäusekunststoffe, eine Problemfraktion der Elektroaltgeräteverwertung, einer umfassenden stofflichen Verwertung zugeführt werden können, mit RoHS-konformen Recyclingkunststoffen einerseits und Sekundäradditiven andererseits (Abb. 3, 4). Dabei ergab die wirtschaftliche Betrachtung der neuen Technologie, dass die erhöhten Investitionen zur Additivrückgewinnung innerhalb einer CreaSolv® Kunststoffrecyclinganlage durch die Produkterlöse des Additivs vollständig gedeckt werden können.

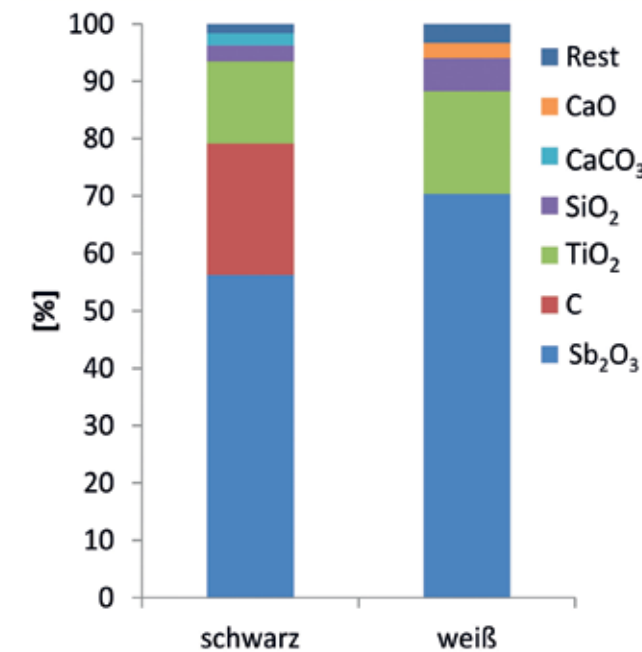


Abb. 3: Die Additive können in zwei Qualitäten wiedergewonnen werden. Ohne Kohlenstoff wird ein weißes Sekundäradditiv mit Antimontrioxidgehalt von 73 % wiedergewonnen (rechts). Im anderen Fall erhält man ein schwarzes Pulver mit 62 % Antimontrioxid, Quelle: ARGUS Additive Plastics GmbH

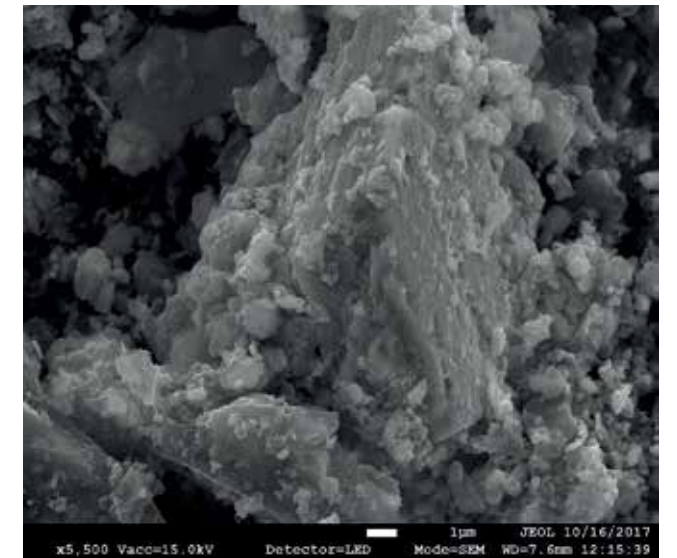


Abb. 4: Ein einzelnes Antimontrioxid-Partikel im Rasterelektronenmikroskop, Quelle: Fraunhofer IVV

Ausblick

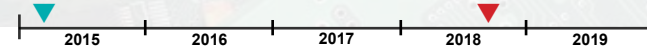
Die CreaSolv® Technologie wird aktuell für mehrere andere Kunststoffabfallfraktionen in den industriellen Maßstab umgesetzt, wodurch sich die Investitionssicherheit für diesen innovativen Prozess deutlich erhöht hat. Die Wirtschaftlichkeit des Prozesses für flammgeschützte Kunststoffe aus Elektroaltgeräten wird sehr positiv bewertet, auch deshalb, weil der Export von flammgeschützten Altkunststoffen nach Asien zunehmend eingeschränkt wird und die hochpreisige thermische Verwertung halogenhaltiger Kunststoffe langfristig keine gute Option bietet.

Kontakt

Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV
Giggenhauser Str. 35
85051 Ingolstadt
Dr. Martin Schlummer | Tel. +49 8161 / 491-750
E-Mail: martin.schlummer@ivv.fraunhofer.de
Projektlaufzeit: 01.03.2015 – 28.02.2018
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 104

AgREE

Ag-Recycling von Elektrolyseelektroden



Zielstellung

Die Sauerstoffverzehrkathode (SVK) von Covestro ist eine Gasdiffusionselektrode, die bei der Chloralkali-Elektrolyse gegenüber dem Stand der Technik bis zu 30 % an elektrischer Energie einspart. Gebrauchte SVKs enthalten 70 % Silber (Ag), 25 % Nickel (Ni) und fünf Prozent Polytetrafluorethylen PTFE. Ziel des Projektes war die Entwicklung eines Recyclingprozesses für Ag und Ni, um die Wirtschaftlichkeit der SVK-Technologie zu verbessern. Das recycelte Silber sollte dabei in einer wiederverwendbaren, katalytisch aktiven Form anfallen. Die zentrale Herausforderung beim Recycling der Elektroden war die vollständige Abtrennung des PTFE. Hierfür wurden sowohl pyrolytische als auch pyrometallurgische Verfahren untersucht und Waschprozesse für feinste PTFE-Partikel erarbeitet. Die zweite Herausforderung lag in der vollständigen Trennung der Metallbestandteile Ag und Ni. Das recycelte Silber sollte für die Herstellung hochaktiver Katalysatoren für SVKs verwendet werden können und eine zielgerichtete Herstellung eines Katalysators aus den anfallenden Recyclingmaterialien im

technischen Maßstab erfolgen. Zwei Verfahren wurden dazu untersucht: die Elektroraffination und die hydrometallurgische Trennung. Bei der Elektroraffination sollte in einer Stufe ein Pulver aus Ag bzw. $\text{Ag}/\text{Ag}_2\text{O}$ gewonnen werden, das direkt wieder zur Herstellung von SVKs einsetzbar wäre. Bei der hydrometallurgischen Trennung war die Erarbeitung eines NO_x -freien Verfahrens für den Löseprozess von inhomogenen Ag/Ni-Legierungen neu.

Ergebnisse

Die vollständige pyrolytische Abtrennung von PTFE wurde demonstriert. Die Verarbeitung der entstandenen fluorhaltigen Abgase war leider zu kostenintensiv und aufwendig. Es wurde daher ein alternatives, umweltfreundliches Verfahren entworfen, welches durch kryogenes Mahlen eine Abtrennung des PTFEs ermöglicht. Das Silber wird im Anschluss durch einen mechanischen Aufschluss und hydrometallurgische Behandlung zurückgewonnen.



Abb. 1: Ultraschallgeneratoren für die Herstellung von Silber-Nanopulver durch Ultraschall-Sprüh-Pyrolyse (USP), Foto: RWTH-Aachen, IME



Bei der elektrochemischen Raffination der pyrometallurgisch gereinigten Silberanoden ist mittels Hochstromelektrolyse ein Metallpulver erzeugt worden, welches Ni-Gehalte < 10 ppm aufweist und gute katalytische Eigenschaften besitzt. Das Metallpulver kann direkt in der Elektrodenfertigung von Covestro eingesetzt und zu neuen SVKs weiterverarbeitet werden. Die Ni-Verunreinigungen gelangen in den unlöslichen Anodenschlamm und werden separat recycelt.

Bei der hydrometallurgischen Trennung wurden die Löseparameter für Ag/Ni-Legierungen im Labormaßstab festgelegt und im technischen Maßstab bestätigt. Das Verfahren zum Lösen von PTFE-freien SVKs im technischen Maßstab wurde demonstriert und die Raffination von Rohsilber zu einem aktiven Vorstoff zur Katalysatorproduktion im kg-Maßstab reproduzierbar gezeigt. Die Auslegung der technischen Löseanlage sowie die Aufarbeitung der Nickel-Salzlösung und der Hilfschemikalien sind vervollständigt worden.

Ag-Pulver aus der Elektroraffination und der hydrometallurgischen Trennung wurden systematisch in SVK-Elektroden eingearbeitet und geprüft. Die Leistung der SVK-Elektroden mit recyceltem Silber ist vergleichbar mit der Leistung der Standard-SVKs. Feinteilige Ag_2O -Pulver von SJM wurden in zweilagige SVK-Elektroden eingearbeitet und getestet. Die Leistung der Elektroden ist sehr gut auch bei höheren Stromdichten, aber die eingesetzte Katalysatormenge ist noch zu hoch.

Mithilfe einer Ökobilanz wurden die Recyclingprozesse ganzheitlich bewertet. Die Ergebnisse der Ökobilanz zeigen, dass die Umweltwirkungen durch alle Recyclingprozesse verringert werden können. Zum Beispiel ermöglicht das SVK-Recycling mittels pyrolytischer PTFE-Abtrennung und anschließender hydrometallurgischer Trennung eine 96 %ige Silberrückgewinnung. Dadurch können die Treibhausgasemissionen zwischen 85 und 90 % reduziert werden. Zusätzlich zeigt die ökonomische Bewertung, dass dieses Recyclingverfahren auch wirtschaftlich umsetzbar wäre.

Ausblick

Covestro plant eine neue großtechnische Chlorproduktionsanlage in Tarragona, Spanien, wobei die NaCl-SVK Technologie verwendet wird. Covestro wird die SVK-Elektroden für diese Anlage selber in Leverkusen herstellen und in Zukunft gebrauchte Elektroden dem Recycling zuführen, wodurch der Wertschöpfungskreis sowohl beim Silber als auch beim Nickel geschlossen werden kann. Der Markt für SVK-Elektroden zur

Anwendung in der Chlorelektrolyse entwickelt sich bisher langsamer als ursprünglich angenommen. Covestro erwartet, dass die erfolgreiche Inbetriebnahme der neuen Anlage in Tarragona auch andere Chlorhersteller motivieren wird, die SVK-Technologie zu verwenden.



Abb. 2: Löseanlage zur Ermittlung der technischen Löseparameter für Silber-Nickel-Legierungen; Foto: Siegfried Jakob Metallwerke GmbH & Co. KG

Kontakt

Covestro Deutschland AG
COV-CTO-PUR-TCBC-PRD
Geb. R17 / Raum 0.01
51373 Leverkusen
Dr. Konstantinos Douzinas | Tel. +49 214 6009 5680
E-Mail: konstantinos.douzinas@covestro.com
Projektlaufzeit: 01.03.2015 – 31.08.2018
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 104



DIBRAS

Direkter Einsatz von selbstreduzierenden Briketts in den Aggregaten der Stahl- und Gießereiindustrie zur Verbesserung der Ressourcenbilanz



Zielstellung

Chrom, Molybdän, Niob, Vanadium, Wolfram und Zinn – eine Reihe wirtschaftsstrategischer Metalle sind in Reststoffen aus der Produktion hochlegierter Stähle beziehungsweise von Primärzinn enthalten. DIBRAS hat sich zum Ziel gesetzt diese wieder in den Wertstoffkreislauf zurückzuführen. Aktuell werden anfallende Schlacken im Straßenbau verwendet oder deponiert, womit die verbliebenen wertvollen Metalle verloren gehen.

Dass derzeit nur eingeschränkt recycelt wird, liegt vor allem daran, dass die Metalle nicht rein, sondern als Oxide, also mit Sauerstoff gebunden, vorliegen. Für eine erneute Nutzung in der Stahlindustrie muss der Sauerstoff zunächst entfernt werden.



Abb. 1: Selbstreduzierende Briketts (50mm und 150mm), Foto: Andreas Wolff, Universität Duisburg-Essen



Abb. 2: Schmelzversuch mit selbstreduzierendem Brikett, Foto: Dominik Ebert, Universität Duisburg-Essen

Hierzu gewinnen die beteiligten Spezialisten aus Deutschland und Brasilien aus den Reststoffen zunächst ein Konzentrat, das, vermischt mit einem Reduktionsmittel, zu Briketts gepresst wird. Direkt in die Öfen der Stahlindustrie eingebracht, werden die Metalloxide im Kontakt zum Kohlenstoff bei den dort herrschenden hohen Temperaturen reduziert, also vom Sauerstoff befreit. Abb. 3 zeigt eine Reihe von Briketts, die bei 1600°C, einer bei der Stahlherstellung üblichen Temperatur, unterschiedlich lang im Ofen erhitzt wurden. Zu Beginn der Behandlung besteht das Brikett aus feinkörnigen, dunkelgrauen und schwarzen Partikeln, den Oxiden und dem Kohlenstoff. Mit fortschreitender Dauer werden die Oxide zu hell glänzenden Metallen reduziert und können in die Stahlschmelze übergehen. Energie- und kostenintensive separate Aufbereitungsprozesse werden so vermieden.

Ergebnisse

Zur Verfahrensentwicklung lag der Fokus besonders auf Reststoffen aus der Produktion von Werkzeugstählen. Diese Werkstoffgruppe enthält hohe Konzentrationen besonders wertvoller Metalle, vor allem Vanadium, Molybdän und Wolfram. Bei den untersuchten Reststoffen handelt es sich

hauptsächlich um Schlacken aus dem Schmelzprozess und um so genannten Walzzunder, ein Material, dass durch Oxidation in den Öfen von Schmieden und Walzwerken anfällt.

Für eine sinnvolle Wiederverwertung muss individuell für jedes Material eine optimale Aufbereitung erfolgen, beispielsweise um die richtige Partikelgröße einzustellen. Zur Erzeugung des Konzentrats wurde unter anderem eine magnetische Trennung genutzt. Hierdurch können sowohl eventuell noch enthaltene Metallteilchen als auch Magnetit (Fe_3O_4) abgetrennt werden. Dieses magnetische Eisenoxid weist eine besondere Struktur auf, die die Aufnahme von Metallionen begünstigt, ähnlich wie ein Schwamm Wasser aufnimmt.

Um aus dem aufbereiteten Material stabile Briketts pressen zu können, erfolgten umfangreiche Versuche mit unterschiedlichen Brikettgrößen, Presskräften und Bindern. Es konnten erfolgreich Briketts bis zu einer maximalen Größe von 150 mm Durchmesser hergestellt werden (siehe Abb. 1). Theoretische Berechnungen und Laborversuche ergaben, dass etwa 20 % zugegebener Kohlenstoff als Reduktionsmittel die besten Ergebnisse liefert. Die so erzeugten Briketts wurden in Schmelzversuchen getestet, um herauszufinden, wieviel der als Oxide gebundenen Metalle durch die Reduktion mit dem Kohlenstoff wieder in die flüssige Stahlschmelze zurückgeführt werden können (Abb. 2). Je nach Element konnten teilweise sehr hohe Rückgewinnungsquoten nachgewiesen werden, wie in Abb. 4 zu sehen ist. In dieser Abbildung stellen die blauen Balken die Menge des jeweiligen Elements im Brikett dar, während die roten Balken zeigen,

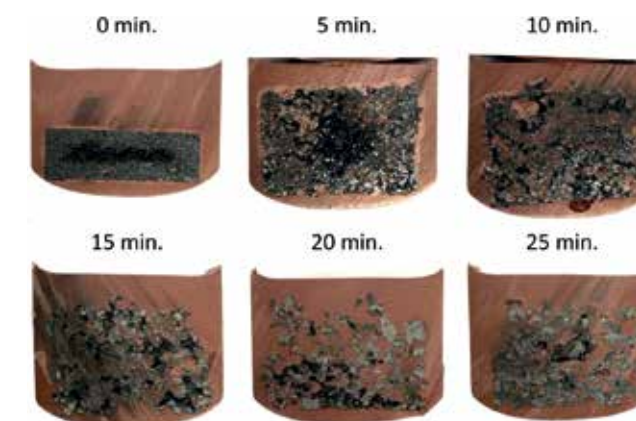


Abb. 3: Reduktion der Metalloxide bei 1600 °C, Quelle: Ying Wang, Universität Duisburg-Essen

Kreislaufführung von Altprodukten | DIBRAS

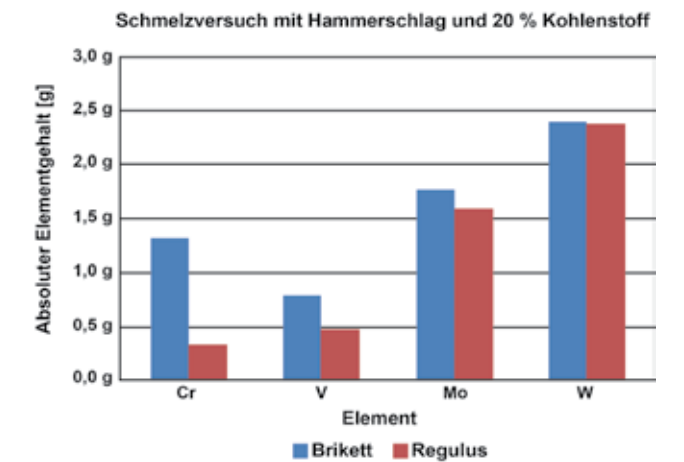


Abb. 4: Rückgewinnung von verschiedenen Metallen, Quelle: Dominik Ebert, Universität Duisburg-Essen

wieviel dieses Elements nach dem Versuch in der Stahlschmelze gefunden wurden.

Ausblick

Bei erfolgreichem Abschluss des Projekts steht der Stahlindustrie ein sehr flexibles Verfahren zur Verfügung, mit dem eine Vielzahl an Reststoffen teilweise oder sogar ganz wieder in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt werden können. Dies schont die natürlichen Reserven und reduziert die Abhängigkeit von Importen, während gleichzeitig die Kosten für die Entsorgung der Reststoffe und die Neubeschaffung der Metalle gesenkt werden. Aufbereitungsunternehmen, wie beispielsweise der Partner RHM, können neue Dienstleistungen anbieten und somit nachhaltige Arbeitsplätze sichern.

Kontakt

Universität Duisburg-Essen
Institut für Technologien der Metalle
Friedrich-Ebert-Str.12
47119 Duisburg
Prof. Dr. Rüdiger Deike | Tel. +49 203 3793455
E-Mail: ruediger.deike@uni-due.de
Projektlaufzeit: 01.08.2016 – 31.07.2019
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 106

Hightech-Metalle aus Elektroschrott recyceln

Abfallströme wie Elektro- und Elektronikaltgeräte, kurz EAG, bieten große Chancen für das Recycling nahezu aller relevanten Metalle – doch ihr Potenzial wird nach heutigem Stand bei weitem nicht ausgeschöpft. Das Projekt befasste sich mit den Zielmetallen Gallium, Germanium, Neodym und Tantal – aus den Elementsymbolen ergibt sich der Titel des



Abb. 1: Leiterplatte mit Tantalkondensatoren, Foto: Fraunhofer UMSICHT

Vorhabens: „gagendta“. Oft werden die genannten Metalle zusammen mit Dysprosium, Indium, Praseodym und Yttrium eingesetzt, die als Begleitmetalle deshalb ebenfalls betrachtet werden – dafür steht das Plus hinter gagendta. Die acht betrachteten Metalle haben End-of-Life-Recyclingraten, beispielsweise aus EAG, von unter einem Prozent.

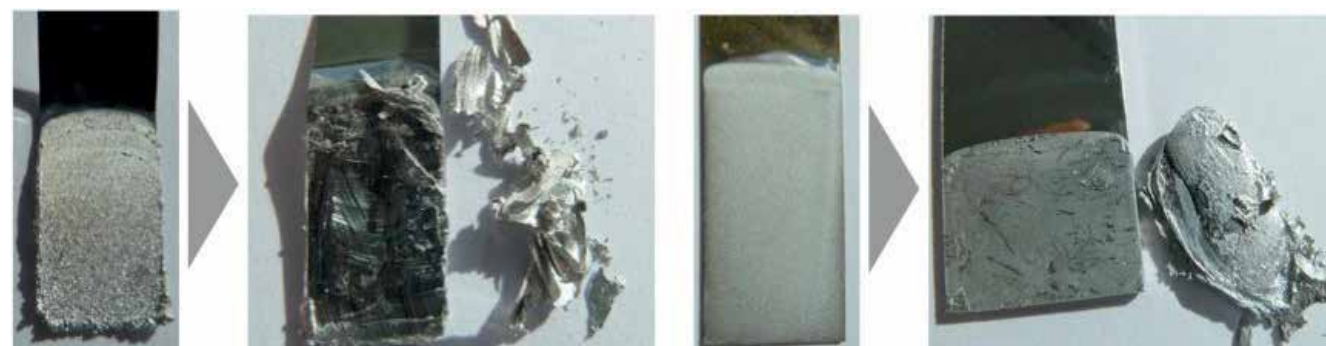


Abb. 2: Abscheidung von Indium (links) und Gallium (rechts), Fotos: Fraunhofer IPA

Im Projekt sollten ausgewählte Stoffströme aus EAG daher in einer Kaskade aus sechs Schritten aufbereitet und enthaltene Zielmetalle sukzessive angereichert bzw. zurückgewonnen werden. Die Einzelschritte waren Stoffstrommanagement, Vorbehandlung, thermo-chemische Stofftrennung, mechanische Rückstandsaufbereitung, Metallfraktionierung und Rückführung in die Wirtschaft. Flankiert wurden diese Schritte von einer Bewertung der neuen Prozesskette.

Ergebnisse

Je nach fokussiertem Metall, wandten die beteiligten Projektpartner unterschiedliche Verfahren zur Freilegung und Anreicherung der Zielmetalle in der Prozesskette an. So konnten Bauteile von Leiterplatten, insbesondere Tantalhaltige Kondensatoren, mit Hilfe der Elektrohydraulischen Zerkleinerung (EHZ) des Fraunhofer-Instituts IWKS effizient von den Leiterplatten gelöst werden. Zur thermo-chemischen Stofftrennung entwickelten die Firma Kautz Technologies und Fraunhofer UMSICHT einen Pyrolyseprozess, der in der Lage ist rund 70 kg EAG pro Stunde kontinuierlich aufzubereiten und die Zielmetalle schonend freizulegen. Als Produkte erhält man dabei ein festes Metallkonzentrat sowie flüssige und gasförmige Energieträger. Während letztere die Firma Hubert Tippkötter motorisch zur Strom- und Wärme Gewinnung nutzte, gingen die Metallkonzentrate zur mechanischen Aufbereitung.



Abb. 3: Demonstrationsreaktor zur thermo-chemischen Aufbereitung im gagendta⁺-Projekt, Foto: Fraunhofer UMSICHT

Erfolgreiche Rückgewinnung dargestellt

Am Beispiel Tantal aus Leiterplatten zeigte sich, dass bereits mittels thermo-chemischer Stofftrennung und mechanischer Aufbereitung ein verkaufsfähiges Tantalkonzentrat gebildet werden konnte. Jedes der Metalle benötigte jedoch eine andere Verfahrenskombination. So haben sich die Forschenden zur Rückgewinnung des Begleitmetalls Indium den niedrigen Siedepunkt von Indiumchlorid zunutze gemacht, um das Hightech-Metall aus LCD-Panels zu extrahieren. Als Chlorquelle wurden chlorhaltige Abfälle genutzt, was den Prozess besonders wirtschaftlich gemacht hat. Nach einer Flüssig-Flüssig-Extraktion, konnte das Zielmetall dann durch das Fraunhofer-Institut IPA mittels wässriger Elektrolyse gediegen zurückgewonnen werden.

Für die Rückgewinnung der weiteren Zielmetalle, fokussierten sich die Projektpartner vor allem auf Shredderrückstände, die, aufgrund großer vorhandener Mengen und signifikanter Metallgehalte, eine wichtige Quelle für nahezu alle Zielmetalle darstellten. Zur Rückgewinnung der Metalle kamen dabei neben thermo-chemischen und mechanischen Verfahrensschritten auch biosorptive Prozesse am Fraunhofer-Institut IGB zum Einsatz.

Ausblick

Im Rahmen des Projekts konnte die wirtschaftliche Rückgewinnung von Tantal und Indium aus EAG bereits erfolg-

reich gezeigt sowie für die weiteren Elemente zahlreiche teils grundlegende Erkenntnisse in der Aufbereitung dieser Metalle erlangt werden.

Gemeinsam mit dem r⁴-Projekt „AddResources“ wurde der thermo-chemische Prozess der Stofftrennung mit einem lösemittelbasierten Recyclingprozess für Kunststoffe, dem „CreaSolv®-Prozess“ des Fraunhofer IVV, kombiniert und so das Recycling und der Wiedereinsatz von Titan- und Antimonoxiden gezeigt. Zur Kommerzialisierung der thermo-chemischen Aufbereitungsanlage, mittlerweile markenrechtlich geschützt als „iCycle®“ Technologie, plant Fraunhofer UMSICHT zudem eine Ausgründung zur Aufbereitung von Shredderrückständen aus EAG.

Kontakt

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT,
Institutsteil Sulzbach-Rosenberg
An der Maxhütte 1
92237 Sulzbach-Rosenberg
Dr. Peter Hense | Tel. +49 9661 908-435
E-Mail: peter.hense@umsicht.fraunhofer.de
Projektlaufzeit: 01.06.2015 – 28.02.2019
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 108



MExEM

Keramische Membranextraktionssysteme und adaptierte elektrochemische Verfahren zur Gewinnung metallischer Rohstoffe aus niedrigkonzentrierten Lösungen



Neben niedrigkonzentrierten Prozesswässern der metallverarbeitenden Industrie nahmen die MExEM-Projektpartner auch Bergbaurückstände als Rohstoffquelle für wirtschaftsstrategische Metalle ins Visier. Hierzu entwickelten und erprobten sie eine neuartige Recycling-Technologie.

Ergebnisse

Schlackenhalde aus bergmännischen Auffahrungen sowie Spülhalde aus feinkörnigen Abgängen der Erzaufbereitung und Metallurgie im ehemaligen Bergbaurevier Freiberg waren Forschungsgegenstand. Mittels mikrobiologischer Laugung wurden die Wertelemente extrahiert. Während die Laugungslösung von Materialien von Schlackenhalde vor allem die Elemente Zink, Antimon, Kupfer, Indium und Blei in beachtlicher Konzentration enthielt, waren die entsprechenden Konzentrationen in der Laugungslösung von der Spülhalde vergleichsweise niedrig.

Die Metallgewinnung aus der Laugungslösung der Schlackenhalde zeigte ein erhebliches Erlöspotenzial, wobei der Hauptanteil auf Zink entfällt (60 %). Ein dafür untersuchter dreistufiger Voranreicherungsprozess würde die Gewinnung ermöglichen. Im ersten Schritt konnten durch galvanische Abscheidung zunächst die elektrochemisch edleren Metalle Ag, Cu und Sb von den übrigen Komponenten weitestgehend

abgetrennt werden. Dabei wurde auch das Arsen mit entfernt. In einem zweiten Abscheidungsschritt, nach Abtrennung des größten Teils der Säure aus der Laugungslösung mittels Elektrodialyse, gelang die Gewinnung von Zink, Blei und Indium mit befriedigender Ausbeute (Abb. 1).



Abb. 2: Membrankontaktormodul vor Einbau in die Demonstratoranlage – Gesamtansicht (oben), Detailansicht der Stirnseite (unten), Foto: Fraunhofer IKTS

Bei dem geringeren Wertinhalt der Spülhalde Hammerberg ist mit der in MExEM entwickelten Technologie eine Verwertung derzeit nicht wirtschaftlich möglich.“

Keramische Membran zur Extraktion der Metalle aus Lösungen entwickelt

Ein Schwerpunkt lag in der Entwicklung eines keramischen Membrankontaktors zur Gewinnung von Metallen aus niedrigkonzentrierten Lösungen. Bei der Membranextraktion wird eine wässrige Phase (mit den Zielementen) mit einer organischen Phase (Extraktionsmittel) an der Membranoberfläche in Kontakt gebracht. Der entscheidende Vorteil gegenüber dem konventionellen Extraktionsprozess ist dabei, dass beide Phasen nicht miteinander vermischt werden. Die Prozessführung kann daher kontinuierlich erfolgen. Verschleppungen von Verunreinigungen in das Zielprodukt werden auf diese Weise vermieden.

Es ist gelungen, eine keramische Membran zu entwickeln, die die Anforderungen für einen stabilen Extraktionsprozess

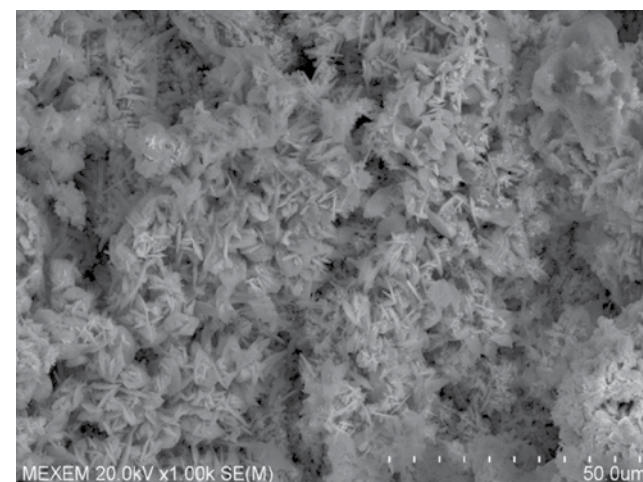


Abb. 1: Deckschicht-Morphologie der kathodischer Abscheidung von Zn, Pb und In aus Laugungslösung, Bildung von plattigen und dendritischen Kristalliten, Foto: Fraunhofer IKTS



hinsichtlich chemischer Beständigkeit sowie ausreichend großer Kontaktfläche erfüllt. Dazu wurden verschiedene Membrantypen unterschiedlicher Porenweite und Porosität synthetisiert, geeignet beschichtet (hydrophobiert) und anschließend in einer Labor-extraktionsanlage mit Modell- und realen Prozesswässern der Nickelhütte Aue (Cu-Bi-Lsg.) getestet. Hinsichtlich der Membrangeometrie wurden Einkanalelemente sowie Kapillaren gefertigt und in ein speziell dafür entwickeltes Modul für die kontinuierliche Extraktion übertragen (Abb. 2). Es zeigte sich, dass der Stoffübergang der Zielemente an der Membrankontaktfläche bei den untersuchten Membranen limitiert ist und nur relativ geringe Ausbeuten erzielt werden konnten. Um die Kontaktfläche zu erhöhen, wurden im weiteren Projektverlauf Hohlfaserbündel entwickelt. Diese Arbeiten stießen jedoch auf neue Herausforderungen, etwa das Abdichten der Hohlfasern (Potten), und konnten im Projektverlauf nicht abgeschlossen werden.

Die Firma Junghans Anlagenbau GmbH entwickelte eine komplexe Demonstrationsanlage für die kontinuierliche membrangestützte Extraktion (Abb. 3). Auch die Versuche im Demonstrator-Maßstab bestätigten den nur sehr geringen Transfer des Modell-Ions Kupfer in die Extraktionsmittelfase. Abschließend bleibt damit festzustellen, dass unter Einsatz der aktuell verfügbaren Membranen noch kein wirtschaftlich konkurrenzfähiges Verfahren etabliert werden konnte.

Ausblick

Hinsichtlich der Gewinnung von werthaltigen Metallen aus bergbaulichen Halde zeigen sich wirtschaftliche Optionen, die jedoch bezüglich ihrer Nutzung an genehmigungsrechtliche Hürden stoßen. Bei den Entwicklungsarbeiten zur keramischen Membranextraktion wurden wesentliche Fortschrit-



Abb. 3: Entwickelter Demonstrator zur membrangestützten Selektiv-Extraktion, Foto: Andreas Junghans Anlagenbau und Edelstahlbearbeitung GmbH & Co. KG

te erzielt, jedoch besteht weiterer Forschungsbedarf, hin zu einer, verglichen mit den etablierten Verfahren, konkurrenzfähigen Alternative.

Kontakt

Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS)
Winterbergstraße 28
01277 Dresden
Dr. Burkhardt Faßauer | Tel. +49 351 2553-7667
E-Mail: burkhardt.fassauer@ikts.fraunhofer.de
Projektlaufzeit: 01.05.2015 – 31.10.2018
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 111



NeW-Bat

Neue energieeffiziente Wiederverwertung von Batteriematerialien



Zielstellung

Lithium-Ionen-Batterien sind eine Schlüsseltechnologie für die Energiewende. Durch den wachsenden Markt der Elektromobilität und den damit einhergehenden Anstieg der Altproduktstoffströme stellen diese Energiespeicher gleichermaßen eine wertvolle Rohstoffquelle dar. Ziel des Projekts „NeW-Bat“ war die Entwicklung eines neuen energieeffizienten Recyclingverfahrens, basierend auf mechanischer und elektrohydraulischer Zerkleinerung, mit dem die einzelnen Batteriematerialien kostengünstig voneinander getrennt und aufbereitet werden können.



Abb. 1: Pilotanlage zur elektrohydraulischen Zerkleinerung im Technikumsmaßstab am Standort Alzenau, Foto: Fraunhofer IWKS

Ergebnisse

Anders als beim rein metallurgischen Recycling, haben die Partner des Projekts NeW-Bat im neuen Verfahren nicht nur die reinen Metalle, sondern auch die synthetisierten Basismaterialien der Batterien zurückgewonnen. Mit der elektrohydraulischen Zerkleinerung (EHZ) (Abb. 1) und nachfolgender Sortierung ist es nun möglich, drei verschiedene Materialfraktionen zu separieren und aufzukonzentrieren

(Abb. 2). Die gereinigten Metalle und Kunststoffe können direkt den üblichen Wertstoffkreisläufen zugeführt werden, während das hochreine Batterieaktivmaterial (Nickel-Cobalt-Manganoxid NCM, Nickel-Cobalt-Aluminiumoxid NCA, Lithium-Titanat-Oxid LTO) in einem thermischen Aufbereitungsschritt von Bindern und Kohlenstoffen abgetrennt wird. Mittels Röntgendiffraktometrie kann die für die Aktivmaterialien erwartete Phasenzusammensetzung kontrolliert und bestätigt werden.

Im Labormaßstab wurden anschließend aus dem recycelten Batteriematerial neue Elektroden hergestellt und in Testzellen untersucht. Alle betrachteten Elektrodenmaterialien sind nach der Behandlung elektrochemisch aktiv, unterscheiden sich jedoch deutlich in ihren spezifischen Kapazitäten. Für das feuchtigkeitsempfindlichere NCA ist der Wert mit ca. 50 mAh/g bei niedrigen Strömen deutlich geringer, verglichen mit den Ausgangsmaterialien (ca. 180 mAh/g). Untersuchungen an Referenzmaterialien belegen, dass die spezifische Kapazität mit zunehmender Wassere xpositionsdauer abnimmt und NCA deutlich feuchtigkeitsempfindlicher ist als NCM. Weitere Entwicklungsarbeiten zeigten, dass mit einem Regenerierungsschritt (Kompensation des Lithiumverlusts im Wasser) bessere Ergebnisse erzielt werden können, dieser aber noch optimiert werden muss, um die spezifische Kapazität und elektrochemische Stabilität des Referenzmaterials zu erreichen. Für NCM (ca. 160 mAh/g) und LTO (ca. 165 mAh/g) dagegen liegt die spezifische Kapazität bereits im erwarteten Bereich der Ausgangsmaterialien. Aber auch für diese Aktivmaterialien ist noch Entwicklungsarbeit bei der Elektrodenverarbeitung erforderlich, um die elektrochemischen Eigenschaften u. a. in Bezug auf Zyklenfestigkeit weiter zu verbessern (Abb. 3).

Ausblick

Zum Abschluss des Vorhabens erfolgten Lebenszyklusanalysen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit des neuen EHZ-Recyclingverfahrens sowie eines mit diesem kombinierten bestehenden Verfahrens des Partners Walch. Dabei sind die Investitions- und Betriebskosten der Verfahren



Abb. 2: Wiedergewonnene Materialfraktionen aus dem EHZ-Prozess: Metalle (links), Kunststoffe (rechts), Elektrodenmaterial (vorne), Foto: Fraunhofer IWKS

dem ökonomischen Vorteil, der sich aus der Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen ergibt, gegenübergestellt. Durch die prozessspezifische Ökobilanzierung der direkten Verfahrensabläufe sowie der dabei eingesetzten Stoff- und Energieströme wurden die mit den Verfahren verbundenen Umweltauswirkungen analysiert. Die Untersuchung zeigt, dass durch die Integration der Recyclingverfahren eine Reduktion der spezifischen Kosten von über 10 % erreicht werden kann.

Dem Einsatz des gängigen mechanischen Zerkleinerungsverfahrens können gegenüber dem EHZ-Prozess im

Rahmen der Datengenauigkeit marginale Kostenvorteile attestiert werden. Diese gehen aber zu Lasten einer niedrigen Ressourceneffizienz bezüglich der eingesetzten Sekundärrohstoffe. Eine Hot-Spot-Analyse ergab, dass die Betriebskosten des EHZ-Verfahrens durch Senkung der Systembetriebs- und Entsorgungskosten weiter reduziert werden können. Aus ökologischer Sicht ließen sich mit dem im Projekt NeW-Bat entwickelten Recyclingprozess künftig bis ca. 38 % des kumulierten Energiebedarfs und ca. 35 % kg CO₂-Äquivalent im Vergleich zur Batterieherstellung aus Primärressourcen einsparen.

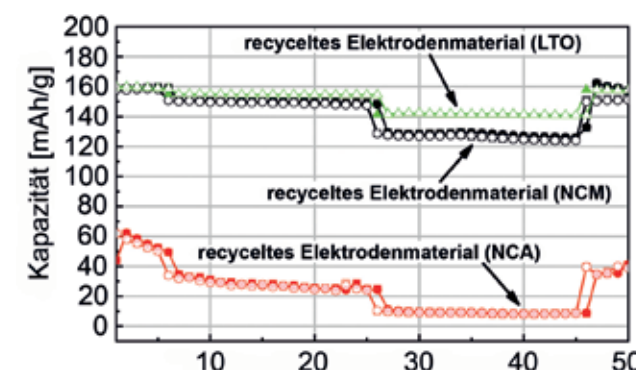


Abb. 3: Spezifische Entladekapazitäten von recycelten Elektrodenmaterialien (gemittelte Werte aus Einzelmessungen) nach der Aufarbeitung. © Fraunhofer ISC

Kontakt

Fraunhofer-Projektgruppe IWKS
Rodenbacher Chaussee 4
63457 Hanau
Daniel Horn, M.Sc. | Tel. +49 6023 32039-854
E-Mail: daniel.horn@isc.fraunhofer.de
Projektlaufzeit: 01.07.2016 – 31.12.2019
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 113

SEMAREC

Entwicklung einer industriell umsetzbaren Recycling-Technologiekette für NdFeB-Magnete



Zielstellung

Kernthema des Forschungsprojektes SEMAREC war die Rückgewinnung von Seltenen Erden (Neodym, Dysprosium, Praseodym, Terbium), die auf der Liste der kritischen Rohstoffe der EU aufgeführt sind. Das Projekt greift unterschiedliche Fragestellungen in Bezug auf das Recycling von NdFeB-Abfällen und die Rückgewinnung enthaltener Seltenen Erden auf.

Ergebnisse

Um das Gesamtpotenzial an verwertbaren NdFeB-Magneten in Europa abschätzen zu können, erfolgte eine Potenzialanalyse NdFeB-haltiger Abfallströme. Das Ergebnis der Analyse ist eine fundierte Datenbasis, die potenziell geeignete Stoffströme und deren Mengen für die geplante Rückgewinnung von Seltenen Erden aufzeigt. Auf Basis der in der Marktrecherche ermittelten Daten, wurden für als relevant identifizierte Stoffströme Demontage- und Aufbereitungsprozesse entwickelt. Die erarbeiteten Prozesse wurden zudem auf ihre wirtschaftliche Machbarkeit hin untersucht. Ein weiterer Fokus lag auf der Weiterentwicklung eines im Rahmen des Forschungsprojektes „MORE“ entwickelten hydrometallurgischen Aufbereitungsprozesses für NdFeB-Magnete, mit dem ein marktfähiges Seltenerd-mischoxid gewonnen werden kann. Das Verfahren weist Optimierungspotenzial hinsichtlich der Rückgewinnung vermarktbare Nebenprodukte sowie der Reduzierung des Chemikalieneinsatzes auf.

Derzeit fallen in Europa etwa 150 t NdFeB-haltige Abfälle pro Jahr aus dem Bereich der Produktions- und Konsumentenabfälle an. Relevante Abfallmengen stammen aus der Magnetproduktion sowie den Bereichen Elektroschrott (vor allem Festplatten), Elektromotoren und Windkraftanlagen. Die gesammelten Abfälle werden für das Recycling nach China und Japan verkauft. Insgesamt reichen die anfallenden Abfallmengen derzeit nicht für ein industrielles Recycling in Europa aus. Zwar kann in den kommenden Jahrzehnten mit deutlich steigenden Abfallmengen aus verschiedenen Anwendungsgebieten gerechnet werden, insbesondere aus der E-Mobilität und

Windkraftanlagen, mit einem Rücklauf hinreichend großer Mengen NdFeB-Magnetabfälle (> 1000 t/a) ist allerdings erst zwischen 2030 und 2035 zu rechnen.

Im Rahmen der Demontagestudien wurden u.a. Festplatten, Industriemotoren, Pedelecs, Lautsprecher und Magnetresonanztomographen auf ihre Demontierbarkeit sowie durchschnittliche Magnet- und SEE-Gehalte hin untersucht. Die manuellen Demontageprozesse wurden anschließend einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unterzogen. Mit Ausnahme



Abb. 1: Rückgewinnung von Bor mittels Ionenaustausch, Foto: TU Clausthal, IFAD



Abb. 2: Ausgebaute Festplatten vor der mechanischen Aufbereitung, Foto: TU Clausthal, IFAD

der Magnetresonanztomographen, ist für die untersuchten Stoffströme eine manuelle Entnahme der NdFeB-Magnete zu deutschen Lohnkosten bei den aktuell eher geringen Marktpreisen für NdFeB-Hartschrotte (ca. 4-5 US\$/kg) nicht wirtschaftlich darstellbar. Seitens der Projektpartner wird daher Forschungsbedarf hinsichtlich automatisierter Demontage- und Aufbereitungstechniken, vor allem für E-Motoren sowie Windkraftanlagen, gesehen.

Für Festplatten wurde zudem ein mechanischer Aufbereitungsprozess im Technikumsmaßstab entwickelt, mit dem ein marktfähiges Magnetkonzentrat erhalten wird. Somit ist die Aufbereitung von Stoffströmen, deren manuelle Demontage nicht wirtschaftlich darstellbar ist, grundsätzlich möglich. Allerdings ließen sich durch den Verkauf des erhaltenen Magnetkonzentrates sowie weiterer Nebenfraktionen (u.a. Aluminium, Platinen) nicht die Prozesskosten decken. Auch in diesem Fall ist die Wirtschaftlichkeit zum aktuellen Zeitpunkt der limitierende Faktor für eine industrielle Umsetzung.

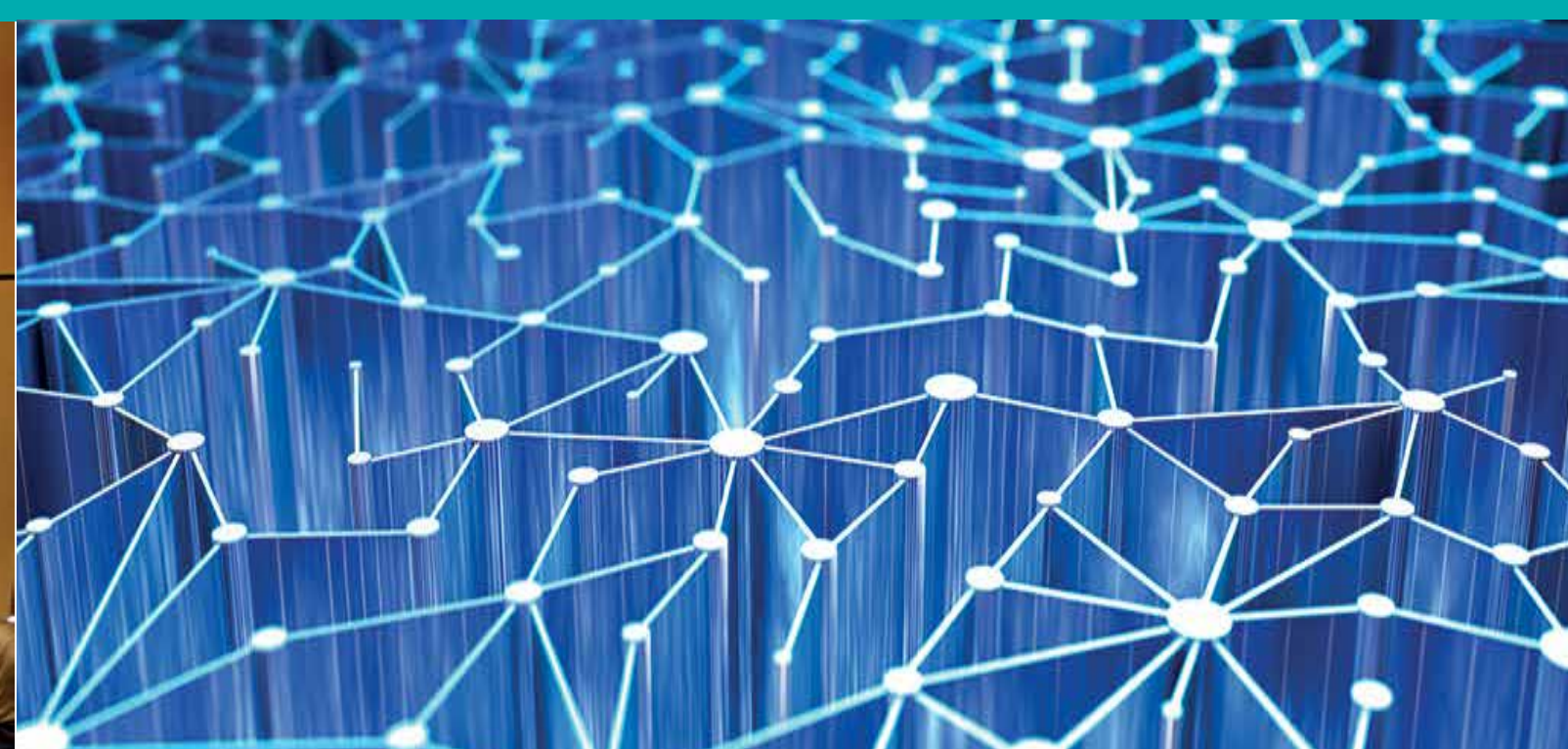
Die Untersuchungen zur Optimierung des hydrometallurgischen Aufbereitungsverfahrens haben gezeigt, dass sich Bor aus den Prozesslösungen mittels Ionenaustausch effektiv zurückgewinnen lässt. Hierdurch lassen sich bei einer Umsetzung zusätzliche Erlöse erzielen. Die Kreislaufführung von Salzsäure ist prinzipiell möglich, allerdings ist der Aufwand hierfür so hoch, dass die Wirtschaftlichkeit zumindest fraglich ist.

Ausblick

Die Untersuchungen im Rahmen des Projektes SEMAREC haben gezeigt, dass das Hauptthema für eine industrielle Umsetzung in Europa die derzeit zu geringen Abfallmengen und die zu teure Extraktion der Magnete sind. Zukünftig liegt das größte Potenzial in den Bereichen Elektromobilität und Windkraft. Daher sollte der weitere Fokus auf der Entwicklung automatisierter Demontage- und Aufbereitungstechnologien für diese Anwendungen liegen. Auch wenn es derzeit noch keinen geschlossenen Stoffkreislauf in Europa gibt, ist die Extraktion der Magnete unter Ressourcengesichtspunkten schon jetzt sinnvoll, da industrielle Recyclingverfahren in China und Japan zur Verfügung stehen.

Kontakt

Technische Universität Clausthal
Institut für Aufbereitung, Deponietechnik
und Geomechanik
Walther-Nernst-Str. 9
38678 Clausthal-Zellerfeld
Prof. Dr. Tobias Elwert | Tel. +49 5323 72-2038
E-Mail: tobias.elwert@tu-clausthal.de
Projektlaufzeit: 01.05.2015 – 31.10.2018
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 116



r⁴-Verbundprojekte
Flankierende Maßnahmen



- r⁴-INTRA
- GERRI

r⁴-INTRA

Integrations- und Transferprojekt

Zielstellung

Das Integrations- und Transferprojekt „r⁴-INTRA“ zielt mit seinem 4-Säulen-Konzept (Abb. 1) darauf ab, die Innovationskraft in r⁴ zu stärken. Dazu vernetzt r⁴-INTRA die 40 r⁴-Vorhaben in vielfältigen Veranstaltungen und unterstützt bei der Kommunikation ihrer Ergebnisse. Was die Fördermaßnahme insgesamt im Hinblick auf Nachhaltigkeit und Versorgungssicherheit erreicht hat, erarbeitet r⁴-INTRA auf Basis eigener Analysen.

Deutschland – ein rohstoffreiches Land

r⁴ deckt einen großen Teil der laut EU-Kritikalitätsmatrix und DERA-Rohstoffliste relevanten Rohstoffe ab. Die Verortung der r⁴-Vorhaben im anthropogenen Rohstoffkreislauf (Abb. 2) zeigt, dass Potenziale der Rohstoffbereitstellung an vielen Stellen im System adressiert werden. Auf Seiten der Primärrohstoff-Vorhaben weisen die Skarnerz-Lagerstätten des Erzgebirges Zinn-Ressourcen im Weltmaßstab auf. Diese können aber bisher aufgrund der komplexen Verwachsung der Erze und Schwierigkeiten in der Aufbereitung nicht wirtschaftlich genutzt werden. Dank der r⁴-Forschungsarbeiten mit intensiver Beprobung und Analytik, neuen 3D-Modellen und innovativen Gewinnungs- und Aufbereitungsprozessen wird eine wirtschaftliche Gewinnung für Zinn wahrscheinlicher.



Abb. 1: Aufgaben der Begleitforschung r⁴-INTRA. Quelle: r⁴-INTRA

Die Potenziale sind enorm. So würde die Gewinnung aus der Lagerstätte Hämmerlein bereits 8 % der deutschen Zinnimporte ersetzen, bei einer Ausdehnung auf acht weitere Lagerstätten im Erzgebirge könnten 59 % und somit sämtliche Importe aus Ländern mit mäßigen bis kritischen Governance-Indikatoren substituiert werden (Abb. 3). Zudem kann allein durch die Lagerstätte Hämmerlein 15 % des deutschen Bedarfs an dem Elektronikmetall Indium abgedeckt werden. Auch auf Seiten der Sekundärrohstoffvorhaben sind für ausgewählte Rohstoffe wie beispielsweise Silber und Antimon große potenzielle Beiträge zur Versorgungssicherheit erkennbar. Dies wird deutlich, wenn man die Rohstoffmenge, die bei voll ausgeschöpftem Verbreitungspotenzial der r⁴-Lösungen maximal gewonnen werden kann, in Verbindung setzt zum Bedarf und der aktuellen Versorgungslage des betroffenen Rohstoffs.

Ökologische und ökonomische Potenziale und Grenzen der r⁴-Lösungen

Im Vergleich zur umweltschädlichen Gewinnung aus Seifenlagerstätten wie in Indonesien könnte ein nachhaltiger Rohstoffabbau in Deutschland geringere ökologische Effekte nach sich ziehen und über die Reduzierung des ökologischen Rucksacks deutscher Zinnimporte die Gesamtrohstoffproduktivität steigern. Eine Quantifizierung dieser Aussagen ist für die Primärrohstoffvorhaben bisher nicht möglich, u. a. weil verlässliche Vergleichsdaten für die Abbaustätten, die konkret ersetzt würden, fehlen. Für die 21 Projekte im Sekundärrohstoffbereich zeigt die bisherige quantitative Analyse der ökologischen Potenziale eine große Bandbreite bzgl. der Wirkungen auf CO₂-Äquivalente, kumulierten Materialaufwand und Primärenergieaufwand. In Summe werden die ökologischen Belastungen gegenüber dem Referenzfall reduziert. Partiiell werden aber auch Grenzbereiche deutlich, in denen Recycling

Flankierende Maßnahmen | r⁴-INTRA

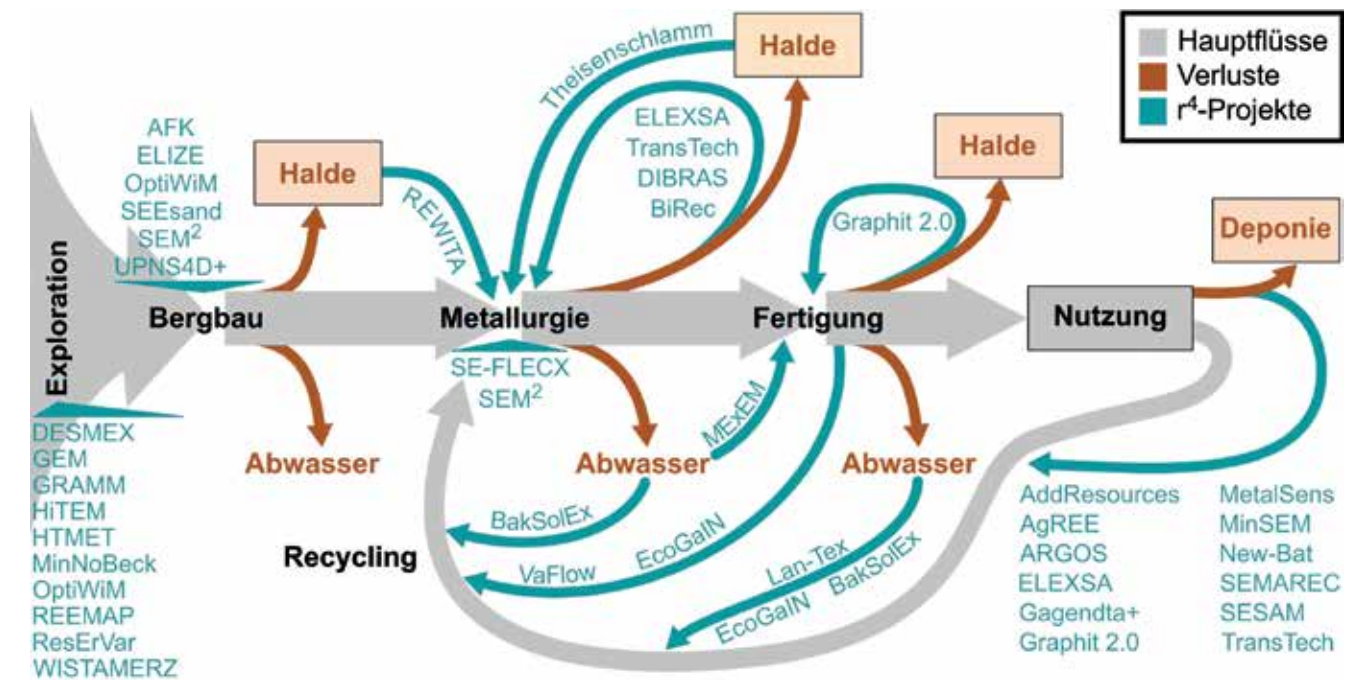


Abb. 2: Verortung der r⁴-Lösungen im anthropogenen Rohstoffkreislauf. Quelle: Fraunhofer ISI

so aufwändig wird, dass es der Primärrohstoffgewinnung ökologisch unterlegen ist. Der Mehrwert dieser Vorhaben liegt dann vor allem in ihrem Beitrag zur Versorgungssicherheit oder bei der Lösung spezifischer Entsorgungsfragen. Inwieweit das (theoretische) Potenzial der mit r⁴-Technologien wiedergewinnbaren Rohstoffe tatsächlich umgesetzt wird, hängt vor allem von der Wirtschaftlichkeit ab. Einige r⁴-Vorhaben, die aus Altmaterial gut zugängliche Rohstoffe zurückgewinnen, erzielen durchaus positive wirtschaftliche Ergebnisse, wohingegen andere, die auf schwer zugängliche Rohstoffe zurückgreifen, bislang nicht wirtschaftlich darstellbar sind.

Ausblick

Die Ergebnisse von r⁴ ändern unseren Blick auf die Rohstoffbereitstellung in Deutschland. Das Verhältnis von heimischer versus ausländischer Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe und auch die Rolle des Recyclings wandeln sich. Viele weitere Ergebnisse und detaillierte

Wirkungsabschätzungen finden sich unter <http://www.r4-innovation.de/de/r4-intra.html>.

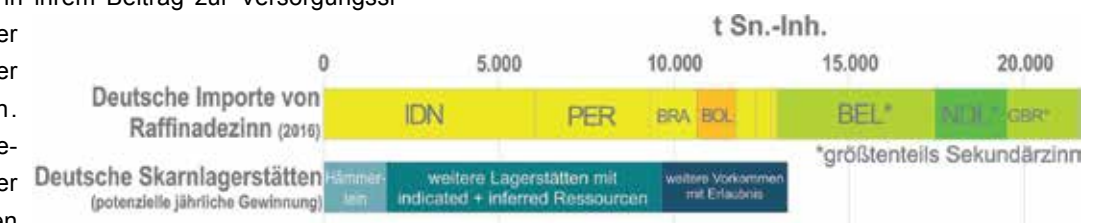


Abb. 3: Oben: Deutsche Importe von Raffinadezinn. Die Farben beziehen sich auf den Governance-Indikator der Weltbank für den jeweiligen Staat (orange: kritisch; gelb: mäßig; grün: unbedenklich). Unten: Potenzielle jährliche Gewinnung in den deutschen Skarnerz-Lagerstätten, Quelle: BGR

Kontakt

CUTEC Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum
Leibnizstraße 23
38678 Clausthal-Zellerfeld
Prof. Dr. Daniel Goldmann | Tel.: +49 5323 72-2735
E-Mail: goldmann@aufbereitung.tu-clausthal.de
www.cutec.de
Projektlaufzeit: 01.01.2015 – 31.12.2019
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 113

GERRI

Einrichtung eines deutschen virtuellen Forschungs-Instituts
„German Resource Research Institute“



Zielstellung

Als ein nationales Netzwerk im Bereich metallischer und mineralischer Rohstoffe verfolgt GERRI insbesondere das Ziel, eine erfolgreiche gemeinsame Forschung entlang der Wertschöpfungskette der Rohstoffe zu erreichen. Dank des breiten Spektrums von Natur-, Ingenieurs-, Gesellschafts- bis



Abb. 1: GERRI Gründungs- und assoziierte Partner, Quelle: GERRI

zu Wirtschaftswissenschaften der Partner, ist GERRI in der Lage, ganzheitliche Lösungsansätze zu komplexen Fragestellungen aus Industrie und Gesellschaft zu entwickeln. GERRI soll für Deutschland ein Innovationskatalysator werden, der die Rohstoffversorgung für eine technologisch fortschrittliche und ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft sichert.

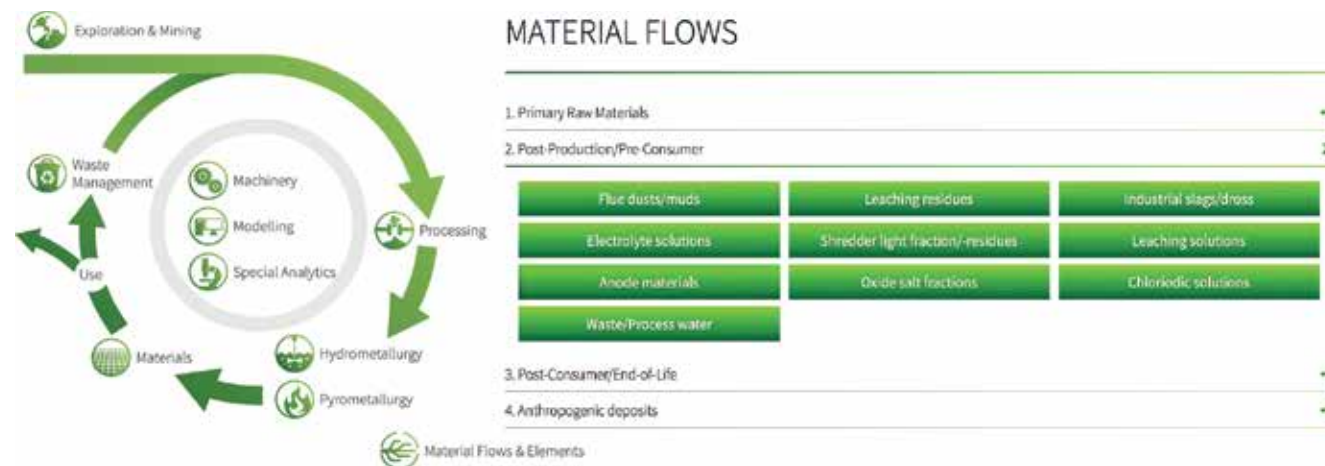


Abb. 2: Kompetenzbereiche sowie Öffentlicher Zugang zu Kompetenzen durch Suche nach Elementen und Stoffströmen (stoffbezogener Ansatz) über die Website, Quelle: GERRI

Kernziele:

- Zentraler Ansprechpartner – mittels GERRI spricht die Rohstoffforschung mit einer Stimme
- Vermittlung und Wissenstransfer zwischen Politik, Industrie und Forschung
- Akquise und Umsetzung gemeinsamer Forschungsprojekte entlang der Wertschöpfungskette, insbesondere von Großprojekten im internationalen Umfeld
- Rohstoffsicherung auf der politischen Agenda in den Fokus zu setzen
- die deutsche Rohstoffforschung im Ausland zu vertreten

Ergebnisse

GERRI wurde 2015 vom Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF) am Helmholtz Zentrum Dresden-Rossendorf, der RWTH Aachen, TU Clausthal, Fraunhofer für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS und TU Bergakademie Freiberg gegründet. Seit der Gründung wurde das Netzwerk mit Aufnahme neuer Partner erweitert (s. Abb. 1). Dieses sind die Europäische Wissens- und Innovationsgemeinschaft EIT RawMaterials (seit 2016), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (seit 2017), sowie die Bundesanstalt für Materialentwicklung (BAM) und TH Nürnberg Georg Simon Ohm (seit 2018).

Flankierende Maßnahmen | GERRI



Mit der Gründung des Vereins GERRI am 26. September 2018 ging das Netzwerk den nächsten Schritt, um die Bündelung der Rohstoff-Expertise aus Wissenschaft und Industrie für den Wirtschaftsstandort Deutschland weiter voranzutreiben.

In der ersten Phase des Projekts wurden Methoden und Geräte in den entsprechenden Kompetenzbereichen der Partner in einer Datenbank erfasst, um Transparenz über die Kernkompetenzen und Infrastrukturen zu schaffen. So können künftig Synergien besser erschlossen, Forschungsstrategien zielorientiert aufeinander abgestimmt und Dritten gegenüber vertreten werden. Die Kompetenzen werden über zwei Ansätze erfasst und ausgewertet:

- verfahrenstechnischer Ansatz (Erfassung nach verfügbaren Methoden und Anlagen)
- stoffbezogener Ansatz (Erfassung nach Zielelementen und Stoffströmen)

Die Datenbank dient dem Sortieren und der Suche nach Bereichen, Methoden und Anlagen, Elementen und Stoffströmen. Hierdurch können gezielt Technologien, Methoden und Ansprechpartner für komplexe Aufgaben gefunden werden. Für die Öffentlichkeit stellt die Website www.gerri-germany.org eine verkürzte, anonymisierte Übersicht der Kompetenzen bereit (s. Abb. 2).

In der zweiten Phase des Projekts wird zwischen den Partnern ein großes strategisches Aktivitätsfeld entwickelt: GERRI soll künftig als Think Tank und Ressourcen Expertenteam für Industrie, Politik und Gesellschaft auftreten. Das Netzwerk leistet Beratung in den strategischen Themenfeldern – den Top Topics. Dazu zählen eine verantwortungsvolle Erkundung und Rohstoffabbau, innovative Prozesstechnologien und das Management sekundärer Rohstoffe. Sie sind dem übergeordneten Ziel der Transformation von einer linearen zu einer zirkulären Wirtschaft untergeordnet (vgl. Abb. 3).



Abb. 3: GERRI-Aktivitätsfelder sowie die Top Topics, Quelle: GERRI

Ausblick

GERRI soll in den kommenden Jahren weiter wachsen und neue Mitglieder aufnehmen. Industriekontakte sollen ausgebaut und die Vertretung in Brüssel intensiviert werden. Um die Rohstoffforschung nachhaltig zu unterstützen, wird GERRI zum Ende der Projektlaufzeit in eine finanziell eigenständige Gesellschaftsform überführt. Das zugrundeliegende Geschäfts- und Finanzierungsmodell befindet sich aktuell in der Entwicklung.

Kontakt

Fraunhofer IWKS
Brentanostraße 2A
09599 Freiberg
Dr. Claudia Güth | Tel. +49 6023 32039-869
E-Mail: info@gerri-germany.org
www.gerri-germany.org
Projektlaufzeit: 01.02.2015 – 31.01.2020
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 109



r⁴-Verbundprojekte

Flankierende Maßnahmen Nachwuchsforscher

- ▶ BakSolEx
- ▶ GORmin
- ▶ GRAMM



BakSolEx

Bakterielle Metallophore für die Solventextraktion

Biologische Komplexbildner für Wertmetalle: Metallophore

Ziel von „BakSolEx“ ist es, neue biobasierte Metallophore zur selektiven Extraktion strategischer Metalle aus Prozesslösungen zu finden. Metallophore sind Komplexbildner, die Metalle beziehungsweise Metalloide an sich binden. Bodenbakterien und einfache Pilze sind Kandidaten für die Produktion solcher Metallophore. Zugleich baut das Projektteam theoretisch erforschte Komplexbildner chemisch nach. Zielmetalle sind Gallium, Kobalt, Molybdän, Silber und Vanadium.

Hintergrund

Bakterien und andere Mikroorganismen müssen verschiedenste Metalle aufnehmen, damit ihr Stoffwechsel, angetrieben durch biochemische Prozesse, ablaufen kann. Dieses geschieht durch Metallophore, biologische Komplexbildner, welche Metalle binden und in beziehungsweise an Mikroorganismen transportieren können. Citrat und Desferrioxamine sind typische Beispiele solcher Komplexbildner, welche bereits industrielle Anwendung finden.

Der Begriff „Metallophor“ geht auf Siderophore zurück. Siderophore (griechisch: sidero = eisern; phore = tragen) sind niedermolekulare Metabolite mit der Fähigkeit Metalle zu binden, speziell Eisen. Seit ihrer Entdeckung und ersten Beschreibungen in den 1950er Jahren werden stetig Neue beschrieben. Diese werden beispielsweise von Bakterien bei Eisenmangel gebildet und in die Umgebung ausgeschleust. Im Projekt wurden über 50 Mikroorganismen auf ihre Fähigkeit Metallophore zu bilden mittels eines Farbscreenings (Abb. 1) durchmustert. Üblicherweise wird diese Methode nur für Eisen eingesetzt.

Ergebnisse

Es konnten, ähnlich dem in Abb. 1 dargestellten Verfahren, weitere Screenings etwa für Gallium, Arsen, Kupfer, Aluminium und Vanadium in Form eines Hochdurchsatzscreenings im Flüssigformat etabliert und angewandt werden. Damit kann nun direkt die Bildung von Metallophoren während



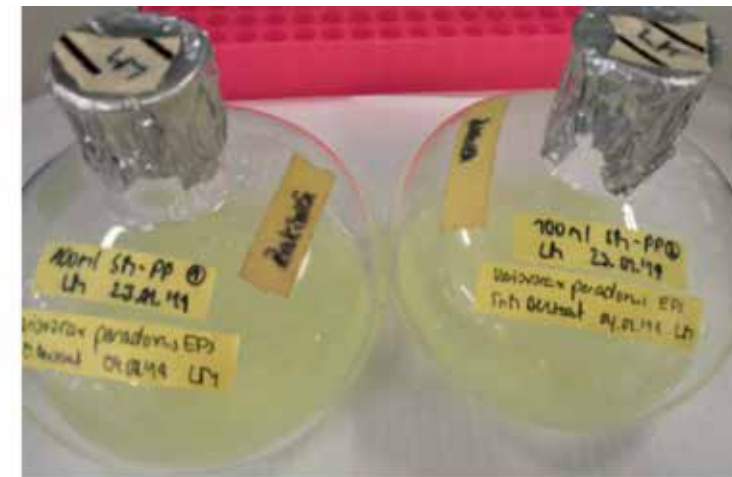
Abb. 1: Durchmustern von Bakterien auf Metallophorbildung – hier auf Festmedien mit blauem Eisenkomplex. Im Fall einer Metallophorproduktion wird dem blauen Komplex das Eisen entzogen und dieser damit entfärbt. Foto: Marika Mehnert, Ringo Schwabe, TU Bergakademie Freiberg

des Screenings oder der Produktion verfolgt werden. Aktuell können bis zu 400 µM (~ 0,325 g/l) Metallophor in speziellen Medien für eine Metallbindungsstudie produziert werden. Dies wird vervollständigt durch genomische und transkriptomische Studien. Es konnten so entsprechende Gencluster zur Biosynthese von Metallophoren in sechs verschiedenen Bakterienarten identifiziert werden. Diese gezielt zu manipulieren, um eine noch höhere Produktion an Metallophoren zu generieren, kann nun in Angriff genommen werden.

Es wurden die Siderophore folgender Bakterien strukturell untersucht und auf die Bindung von verschiedensten Metallen und Metalloiden hin durchmustert: Gordonia, Pimelobacter, Pseudomonas, Rhodococcus, Thermocrispum und Variovorax. So konnten neue Desferrioxamine, Heterobactine, Thermochelin- und Variochelin-Derivate detektiert werden.

Im weiteren Verlauf wurde die Produktion ausgewählter Metallophore vom 5-ml, 100-ml, über 300-ml, 1-L hin

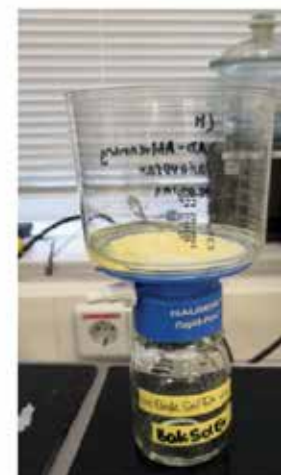
A



B



C



D



E

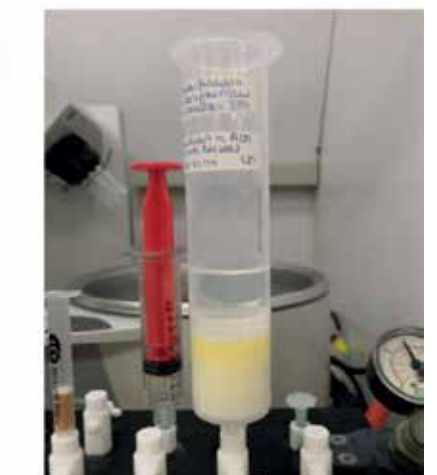


Abb. 3: Isolation von bakteriellen Metallophoren im Labormaßstab – A, Metallophore werden zunächst im 100-ml Maßstab produziert; B die Komplexbildner werden an einen Ionentauscher gebunden und somit aus dem Kulturmedium isoliert und konzentriert; C, die fixierten Metallophore werden gewaschen und anschließend selektiv eluiert; der so erhaltene Metallophorextrakt ist in D dargestellt und E, kann dann an Trägersäulen gebunden werden um selektive Metallbindungsstudien und Extraktionsversuche durchzuführen. Foto: Marika Mehnert, Luise Malik

zum 10-L Maßstab skaliert. Die gebildeten Metallophore wurden isoliert und auf ihre Eigenschaften hin untersucht (Abb. 2). Dazu konnten die zuvor erfolgreich etablierten Gewinnungsmethoden Festphasenextraktion und Flüssigchromatographie, sowie das Hochdurchsatzscreening Anwendung finden.

Ausblick

Die erarbeitete Suchstrategie zur Identifizierung neuer natürlicher Komplexbildner kann in Zukunft routinemäßig Anwendung finden. Zugehörige Testverfahren sind in entsprechenden Fachzeitschriften publiziert worden und können gegebenenfalls leicht auf weitere Zielmetalle und Metalloide angepasst werden. Die Information zu Struktur-Wirkungsbeziehung solcher Metallophore wird die Entwicklung neuer leistungsfähiger Systeme für die Solventextraktion ermög-

lichen. Die Anwendung natürlicher Metallophore in der Solventextraktion befindet sich noch in der Testphase. Pilotstudien sollten aber möglich sein.

Kontakt

Technische Universität Bergakademie Freiberg
Institut für Biowissenschaften
Leipziger Str. 29
09599 Freiberg
Prof. Dr. Dirk Tischler | Tel. +49 3731 39 2103
E-Mail: dirk-tischler@email.de
Projektlaufzeit: 01.01.2015 – 31.12.2019
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 105

GORmin

Governanceoptionen für die akzeptable Gewinnung wirtschaftsstrategischer Ressourcen aus primären und sekundären Lagerstätten in Deutschland



Technologien gesellschaftlich akzeptabel entwickeln

Die Entwicklung von Rohstofftechnologien ist immer in gesellschaftliche Prozesse eingebettet. Technologien wirken in der Gesellschaft, gesellschaftliche Prozesse nehmen aber auch Einfluss auf Technologieentwicklung. Die nicht vorhersagbaren Folgen dieser Wechselwirkungen machen spezielle Governanceansätze nötig.

Im Rahmen des Projekts GORmin haben Nachwuchsforschende untersucht, warum neue Technologien zur Gewinnung von Industriemineralen in Deutschland kontroverse Diskussionen in der Gesellschaft auslösen und wie nichtwissenschaftliche Akteure auf die Entwicklung Einfluss nehmen. Auf Grundlage dieses Wissens und vor dem Hintergrund nachhaltiger Rohstoffgewinnung wurden Instrumente für die Gestaltung von Prozessen der Technologieentwicklung erarbeitet. Diese Instrumente beziehen gesellschaftliche Perspektiven und Ansprüche ein. Sie erlauben es, die Entwicklung neuer Technologien gesellschaftlich akzeptabel zu gestalten.

Interviews und Gruppendiskussionen mit Expertinnen und Experten aus der Rohstoffforschung, Verwaltung, Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft bilden die Datenbasis des Projektes. Räumliche Schwerpunkte sind die Regionen Harz, Erzgebirge und Baden-Württemberg.

Ergebnisse

Soziale Prozesse auf regionaler Ebene beeinflussen, ob Rohstoffpotenziale primärer und anthropogener Lagerstätten überhaupt wahrgenommen werden. Das ist nicht nur eine Voraussetzung für Rohstoffgewinnung, sondern auch für die Durchführung von Projekten zur Technologieentwicklung (Bleicher et al. 2019, David et al. 2019). Dabei kommen Werte wie Landschaftsbilder, Wirtschaftlichkeit, Wissensbestände über Altlasten, Unternehmenswissen sowie Denkmodelle über die öffentliche Meinung oder den Verlust der Bergbautradition zum Tragen.

Es wurden sieben Governanceinstrumente entwickelt, die Möglichkeiten aufzeigen, wie diese regionalen gesellschaftlichen Situationen in Technologieentwicklungsprozesse eingebunden werden können. Sie adressieren Akteure aus Wissenschaft, Politik und Wirtschaft, die die Rohstoffforschung heute entscheidend gestalten.



Einleitung

Verantwortliche Forschung und Innovation (VFI) ist ein Leitbild in der europäischen Forschungspolitik. Es zielt darauf ab, die Gestaltung von Forschung und Technologieentwicklung dahingehend zu verändern, dass gesellschaftliche Debatten integraler Bestandteil der Forschungspolitik werden. Es soll gesellschaftlichen Akteuren möglich sein, den Zweck, die Motivation und die Ausrichtung von Forschung und Innovation zu hinterfragen. Wissenschaft und Technologieentwicklung werden diesem Leitbild zufolge so betrieben, dass sie einerseits besser an gesellschaftlichen Wertvorstellungen, Bedürfnissen und Erwartungen ausgerichtet sind. Andererseits sollen mögliche Auswirkungen technologischer Entwicklungen frühzeitig erkannt und Strategien im Umgang mit ihnen entwickelt werden¹. Verantwortliche Forschungs- und Technologiepolitik ist zukunftsorientiert, antizipativ und reaktionsfreudig im Hinblick auf Technikfolgen. Um das zu erreichen, sollen das Wissen und die Perspektiven unterschiedlicher gesellschaftlicher und wissenschaftlicher Akteure (Forschende, Bürgerinnen und

Bürger, Politikerinnen und Politiker, Unternehmen, Nichtregierungsorganisationen etc.) während des gesamten Forschungs- und Innovationsprozesses eingebunden werden. Dafür braucht es Instrumente, die eine neue Qualität des Austausches von Wissenschaft und Gesellschaft ermöglichen sowie Wissenschaft und Innovationsprozesse für eine Vielzahl von Beiträgen öffnen.

Forschung und Technologieentwicklung für die Rohstoffgewinnung sind mit gesellschaftlicher Kritik konfrontiert. Die Kritik richtet sich insbesondere auf mögliche negative Technikfolgen und den Umgang mit ihnen. Forschung und Technologieentwicklung sind in diesem Bereich bisher traditionell organisiert, die Rollen klassisch verteilt: Wissenschaft, Industrie und Politik bestimmen die Agenda und entscheiden über die Relevanz technologischer Trends sowie möglicher Risiken und Auswirkungen.

¹ Europäische Kommission 2018; Von Schomberg 2011; Foley et al. 2018; Sogner et al. 2018.

Abb. 1: Policy Brief: Rohstoffpolylog - Governanceinstrumente
Quelle: https://www.ufz.de/export/data/2/211524_Policy_brief_GORmin_2018-07-12_fin_barrierefrei.pdf

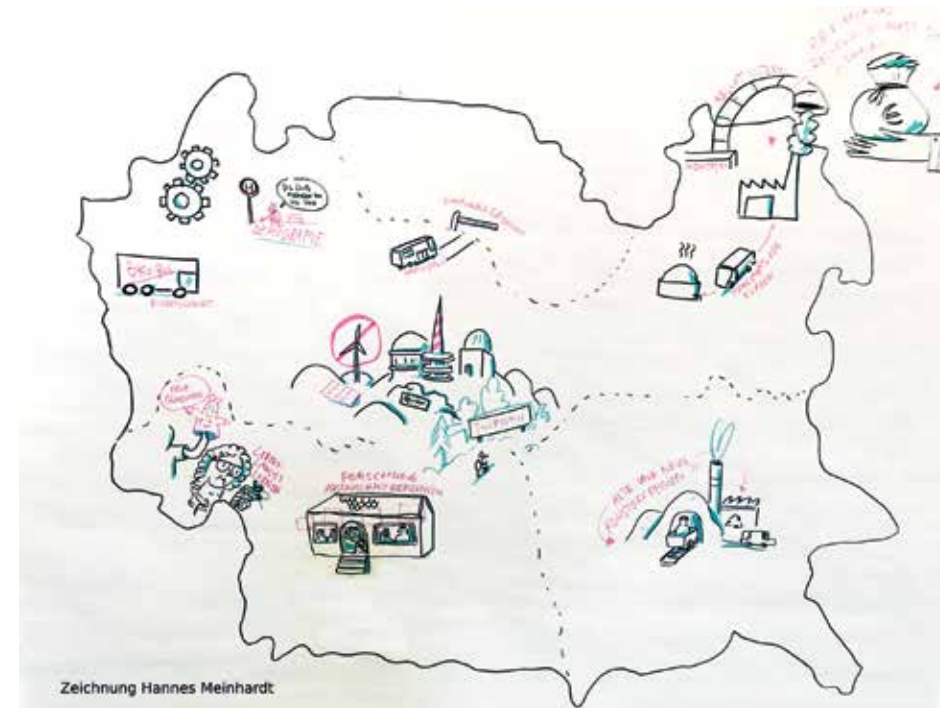


Abb. 2: Themensammlung Szenarioworkshop Recyclingregion Harz, Autoren: Hannes Meinhardt und Verena Herbst

ten. Alle Instrumente zielen auf die Öffnung der Technologieentwicklung für gesellschaftliche Perspektiven und Ansprüche – es soll ein „Rohstoffpolylog“ mit den verschiedenen Akteuren gefördert werden (siehe Bleicher et al. 2018):

- Szenario Rohstoffregion – Das Instrument stellt die vielfältigen regionalen Perspektiven auf Rohstoffgewinnung und Technologieentwicklung und der damit verbundenen möglichen Auswirkungen heraus. Ein regionaler Szenario-Prozess ist eine geeignete Methode.
- Experimentelle Spielräume – Technologieentwicklung wird an der Schnittstelle von Verwaltung und Forschung gestaltet. Das passiert in thematischen Workshops oder im regelmäßigen Austausch von Wissenschaft und Verwaltung.
- Erweiterung von Rohstoffforschungsnetzwerken – Gesellschaftliche Perspektiven und Bedürfnisse gegenüber Technologie und Innovation werden in Expertennetzwerke eingebunden. Zielgruppe sind NGOs und andere gesellschaftliche Akteure.
- Gesellschaftliches Labor – Perspektiven und rohstoffrelevantes Wissen nichtwissenschaftlicher Akteure wird in die Forschung zu Rohstofftechnologien eingebunden. Es soll die gesellschaftliche Öffentlichkeit mit der Thematik in Kontakt bringen und im klar definierten Rahmen Diskussion und Mitsprache ermöglichen.

- Lehrmodul – Das Instrument integriert Konzepte wie Umweltgerechtigkeit, ethische Belange, oder Ansätze des Konfliktmanagement in die naturwissenschaftlich-technische Lehre für Studierende und in die berufliche Weiterbildung.
- Wissensmanagement – Lokales Wissen kann die wissenschaftliche Fragestellung schärfen und wird mit Hilfe dieses Instruments aufbereitet und gemanagt.
- Ethische Beratung für Rohstofftechnologien – Wertekonflikte im Zusammenhang mit neuen Rohstofftechnologien werden in Gremien adressiert. Das erfolgt im Kontext konkreter Projekte, aber auch kontinuierlich in Verbindung mit der Forschung im Rohstoffbereich.

Ausblick

Die Instrumente können in jedem Vorhaben zur Entwicklung von Rohstofftechnologien angewandt werden. Sie geben Technologieentwicklern und gesellschaftlichen Akteuren Werkzeuge zur Verständigung an die Hand.

Die Instrumente können dazu beitragen Zielsetzungen einer nachhaltigen Rohstoffgewinnung zu erreichen. Ihre Anwendung im Rahmen weiterer Forschungsprojekte zur Rohstoffgewinnung ist geplant.

Kontakt

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ
Permoserstr. 15
04318 Leipzig
Dr. Alena Bleicher | Tel. +49 341 235 1745
E-Mail: alena.bleicher@ufz.de
Projektlaufzeit: 01.03.2015 – 29.02.2020
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 109

GRAMM

Quantifizierung lagerstättenbildender Prozesse an granitischen Intrusionen als Grundlage für Explorationsmodelle wirtschaftsstrategischer Spurenmetalle



Fließprozesse von Fluiden in der Erdkruste sind die treibende Kraft für die chemische Anreicherung in hydrothermalen Lagerstätten. Dadurch werden Elemente, die nur spärlich in der Erdkruste vorkommen, aus einem großen Volumen herausgelöst, zu einem klar umgrenzten Bereich der Kruste transportiert und dort durch einen effizienten Ausfällungsmechanismus angereichert.

Zielstellung

Die Forschungsgruppe GRAMM beschäftigt sich mit der Quantifizierung geologischer Prozesse, welche die Anreicherung wirtschaftsstrategischer Spurenmetalle bei der Lagerstättenbildung kontrollieren. Computermodelle des Fließverhaltens metallführender hydrothermaler Lösungen in der Erdkruste und deren Wechselwirkungen mit dem Gestein wurden dabei mit geochemischen Analysen der bedeutendsten Zinn- und Wolframlagerstätten Europas kombiniert.

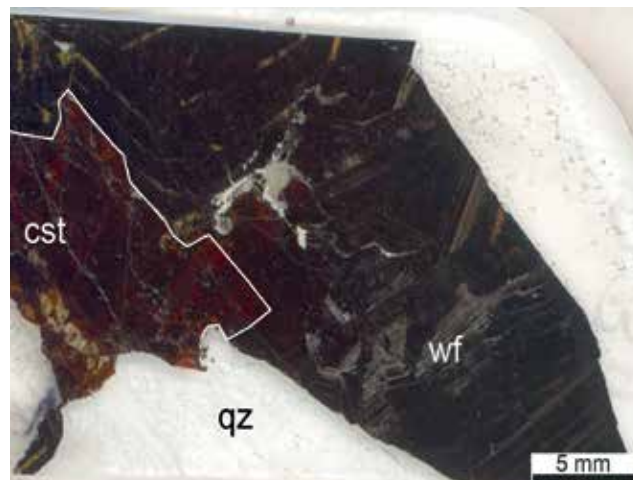


Abb. 1: Gemeinsame Ausfällung von Kassiterit (cst, Zinnstein), Wolframit (wf) und Quarz (qz) in der Sn-W-Li-Lagerstätte Zinnwald, Erzgebirge, Foto: Maximilian Korges, GFZ Potsdam

Diese sind an granitische Intrusionen gebunden und entstehen durch Fluidmischungsprozesse während der Kristallisation der Magmakammer in Kombination mit der che-

mischen Anreicherung im Granit und Umgebungsgestein. Im feld- und analyseorientierten Teil hat sich das Projekt mit einer der weltweit bekanntesten Wolfram (W)-Zinn (Sn)-Minen in Panasqueira (Portugal) und mit aktuellen Explorationsprojekten für Vorkommen von Sn, W, Zn, Li und In im Erzgebirge (Deutschland) befasst. Der Vergleich der verschiedenen Lagerstätten zeigt unterschiedliche Anreicherungsprozesse.

Entstehung von Wolfram-Zinn-Lagerstätten

Flüssigkeitseinschlüsse in Mineralen erlauben einen direkten Einblick in die Chemie und die Bildungsbedingungen der mineralisierenden Fluide. In Zinnwald (Osterzgebirge) zeigen diese, dass es bereits innerhalb des Kuppelbereichs des Granits durch Fluid-Gesteins-Reaktionen zur Zinn-ausfällung kam. Sn- und W-führende Adern, welche den Granitkörper durchschlagen, bildeten sich hingegen durch Druckentlastung und Phasenseparation (Abb. 1). Im Gegensatz dazu entstanden in Hämmerlein (Westerzgebirge) besonders zinnreiche Bereiche durch die Reaktion von frühen salzreichen, heißen magmatischen Fluiden mit besonders reaktiven Zonen des Nebengesteins (Skarne).

In Panasqueira bildete sich die Lagerstätte durch magmatische Fluide in Kontakt mit dem Nebengestein aus Schiefer (Abb. 2), welcher das zur Bildung des Minerals Wolframit notwendige Eisen enthält. Untersuchungen mit Hilfe hochauflösender Massenspektrometrie (SIMS und LA-ICP-MS) auf Spurenelementgehalte und Bor-Isotope in Turmalinen und Hellglimmern zeigen, dass die Lagerstätte durch Abkühlungs- und Reaktionsprozesse entstand. Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass sich hydrothermal gebildeter Hellglimmer besonders gut als „Pathfinder“-Mineral für die Exploration versteckter Lagerstätten eignen könnte.

Simulation erzbildender Prozesse

Das Fließverhalten hydrothermaler Lösungen wird maßgeblich von der Durchlässigkeit (Permeabilität) des Gesteins



Abb. 2: Quarz-Wolframit-Sulfiderz-Adern in Panasqueira, Portugal, Foto: Robert Trumbull, GFZ Potsdam

bestimmt. Die Vielzahl an Adern in hydrothermalen Lagerstätten zeigt, dass heiße Fluide entlang von Brüchen, Spalten und Störungen strömen und diese durch Mineralausfällungen verheilen. Mit Hilfe numerischer Simulationen lassen sich die dabei ablaufenden physikalischen Prozesse untersuchen. So zeigen die Simulationen, dass die erreichsten magmatisch-hydrothermalen Lagerstätten entstehen, wenn die unterliegende Magmakammer in regelmäßigen Abständen mit frischem Magma aus tieferen Krustenlagen gespeist wird. Dabei besteht ein Zusammenhang zwischen der Rate des Magmaflusses und der Stabilisierung des mineralisierenden Hydrothermalsystems. Weitere Simulationen zeigen, wie die mineralisierenden Fluide durch flachliegende Störungsbahnen (Abb. 2) strömen können und den vertikalen Aufstieg und die damit verbundene Alterationszone um mehrere hundert Meter gegenüber der Lagerstätte versetzen können.

Ausblick

Aus der Kombination von geochemischen Analysen und numerischen Simulationen lassen sich bestehende Explorationskonzepte verfeinern oder revidieren. Von be-

sonderem Interesse ist dabei das Gesamtverständnis des erzbildenden Systems, welches wesentlich weiträumiger ist als die eigentliche Lagerstätte. Die Ergebnisse des Projekts können helfen Indikatoren zu entwickeln, welche auf „versteckte“ Lagerstätten hinweisen, die zwar nicht an der heutigen Oberfläche liegen, aber technisch abbaubar wären.

Kontakt

Helmholtz Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum
Telegrafenberg
14473 Potsdam
PD Dr. Philipp Weis | Tel. +49 331-288-28967
E-Mail: philipp.weis@gfz-potsdam.de
Projektlaufzeit: 01.03.2015 – 29.02.2020
Weitere Kontaktdaten und Partner: Seite 109



Kontaktdaten der Verbundpartner



AddResources

Projektkoordinator
Fraunhofer-Institut für Verfahrens-
technik und Verpackung IVV
Giggenhauser Str. 35
85051 Ingolstadt
Dr. Martin Schlummer
Tel. +49 8161 / 491-750
martin.schlummer@ivv.fraunhofer.de

Verbundpartner
ARGUS Additive Plastics GmbH
Oberer Westring 3-7
33142 Büren
Dr. Roland Schlüter
Tel. +49 2951 9909-133
roland.schlueter@argus-additive.de

AFK

Projektkoordinator
Helmholtz-Institut Freiberg
für Ressourcentechnologie
Chemnitzer Str. 40
09599 Freiberg
Prof. K. Gerald van den Boogaart
Tel. +49 351 260 4409
boogaart@hzdr.de

Verbundpartner
Beak Consultants GmbH
Am St. Niclas Schacht 13
09599 Freiberg
Dr. Andreas Barth
Tel. +49 3731 7813-50
andreas.barth@beak.de

Rheinisch-Westfälische Technische
Hochschule Aachen
Templergraben 55
52062 Aachen
Prof. Dr. Hermann Wotrub
Tel. +49 241 80-97246
wotrub@amr.rwth-aachen.de

Technische Universität Bergakademie
Freiberg
Akademiestr. 6
09599 Freiberg
Prof. Dr. Urs Alexander Peuker
Tel. +49 3731 39-2916
urs.peuker@mvtat.tu-freiberg.de

UVR-FIA GmbH
Chemnitzer Str. 40
09599 Freiberg
Dr. Henning Morgenroth
Tel. +49 3731 16212-21
morgenroth@uvr-fia.de

AgREE

Projektkoordinator
Covestro Deutschland AG
COV-CTO-PUR-TCBC-PRD
Geb. R17 / Raum 0.01
51373 Leverkusen
Dr. Konstantinos Douzinas
Tel. +49 214 6009 5680
konstantinos.douzinas@covestro.com

Verbundpartner
Rheinisch-Westfälische Technische
Hochschule Aachen
Intzestraße 3
52056 Aachen
Prof. Dr. Bernd Friedrich
Tel. +49 241 80-95850
bfriedrich@ime-aachen.de

Siegfried Jacob Metallwerke
GmbH & Co. KG
Jacobstr. 41-45
58256 Ennepetal
Stefan Brück
Tel. +49 2333 985-1252
s.brueck@jacob-metall.de

Technische Universität Bergakademie
Freiberg
Akademiestr. 6
09599 Freiberg
Prof. Dr. Michael Stelter
Tel. +49 3731 39-2015
michael.stelter@inemet.tu-freiberg.de

ARGOS

Projektkoordinator
IWARU Institut für Wasser•Ressour-
cen•Umwelt an der FH Münster
Corrensstraße 25
48149 Münster
Prof. Dr. Sabine Flamme
Tel. +49 251 8365-253
flamme@fh-muenster.de

Verbundpartner
LLA Instruments GmbH
Justus-von-Liebig-Str. 9
12489 Berlin
Dr. Günter Buzanich
Tel. +49 30 6290790-31
g.buzanich@lla.de

Rheinisch-Westfälische Technische
Hochschule Aachen
Intzestraße 3
52056 Aachen
Prof. Dr. Bernd Friedrich
Tel. +49 241 80-95850
bfriedrich@ime-aachen.de

Steinert Elektromagnetbau GmbH
Widdersdorfer Str. 329-331
50933 Köln
Dr. Nico Schmalbein
Tel. +49 221 4984-117
schmalbein@steinert.de

Technische Universität Berlin
Straße des 17. Juni 135
10623 Berlin
Prof. Dr. Vera Susanne Rotter
Tel. +49 30 314-22619
vera.rotter@tu-berlin.de

TSR Recycling GmbH & Co. KG
Hafenstr. 98
46242 Bottrop
Herbert Zahm
Tel. +49 203 45007-59
h.zahn@tsr.eu

BakSolEx

Projektkoordinator
Technische Universität Bergakademie
Freiberg
Institut für Biowissenschaften
Leipziger Str. 29
09599 Freiberg
Prof. Dr. Dirk Tischler
Tel. +49 3731 39 2103
dirk-tischler@email.de

BiRec

Projektkoordinator
Berzelius Stolberg GmbH
Binsfeldhammer 14
52224 Stolberg (Rheinland)
Dipl.-Ing. Knut Esser
Tel. +49 2402 1206-500
Kesser.bb@berzelius.de

Verbundpartner
Aurubis AG
Hovestr. 50
20539 Hamburg
Dipl.-Ing. Volker Minne
Tel. +49 40 7883-3239
j.zervos@aurubis.com

GTT Technologies GmbH
Kaiserstr. 103
52134 Herzogenrath
Prof. Dr. Klaus Hack
Tel. +49 2407 59533
kh@gtt-technologies.de

Rheinisch-Westfälische Technische
Hochschule Aachen
Intzestraße 3
52056 Aachen
Tel. +49 241 80-95850
Prof. Dr. Bernd Friedrich
bfriedrich@ime-aachen.de

DESMEX

Projektkoordinator

Westfälische Wilhelms-Universität
Münster
Institut für Geophysik
Corrensstraße 24
48149 Münster
Prof. Dr. Michael Becken
Tel. +49 251 83-36137
michael.becken@uni-muenster.de

Verbundpartner

Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe (BGR)
Stilleweg 2
30655 Hannover
Dr. Uwe Meyer
Tel. +49 511 643-3212
uwe.meyer@bgr.de

Leibniz-Institut für Angewandte
Geophysik (LIAG)
Stilleweg 2
30655 Hannover
Dr. Thomas Günther
Tel. +49 511 643-3494
thomas.guenther@liag-hannover.de

Leibniz-Institut für Photonische
Technologien e.V.
Albert-Einstein-Str. 9
07745 Jena
Dr. Ronny Stolz
Tel. +49 3641 206-119
ronny.stolz@ipht-jena.de

Metronix Meßgeräte
und Elektronik GmbH
Kocherstr. 3
38120 Braunschweig
Dr. Bernhard Friedrichs
Tel. +49 531 8668-270
bernhard.friedrichs@metronix.de

supracon Aktiengesellschaft
An der Lehmgrube 11
07751 Jena
Dr. Vyacheslav Zakosarenko
Tel. +49 3641 2328-167
zakosarenko@supracon.com

Technische Universität Bergakademie
Freiberg
Akademiestr. 6
09599 Freiberg
Prof. Dr. Thomas Seifert
Tel. +49 3731 39-3527
thomas.seifert@mineral.tu-freiberg.de

Universität zu Köln
Albertus-Magnus-Platz
50931 Köln
Prof. Tezkan Bülent
Tel. +49 221 470-3386
tezkan@geo.uni-koeln.de

DIBRAS

Projektkoordinator

Universität Duisburg-Essen
Institut für Technologien der Metalle
Friedrich-Ebert-Str.12
47119 Duisburg
Prof. Dr. Rüdiger Deike
Tel. +49 203 3793455
ruediger.deike@uni-due.de

Verbundpartner

CUTEC Clausthaler Umwelttechnik
Forschungszentrum
Leibnizstr. 23
38678 Clausthal-Zellerfeld
Dipl.-Ing. Sven Schulze
Tel. +49 5323 72-6271
sven.schulze@cutec.de

Dörrenberg Edelstahl GmbH
Hammerweg 7
51766 Engelskirchen
Martin Kühnemund
Tel. +49 2263 79-336
martin.kuehnemund@doerrenberg.de

Friedr. Lohmann Gesellschaft mit
beschränkter Haftung Werk für
Spezial- & Edelstähle
Ruhrtal 2
58456 Witten
Roland Müller
Tel. +49 2302 7014-245
rmueller@lohmann-stahl.de

RHM Rohstoff-
Handelsgesellschaft mbH
Rheinstr. 141
45478 Mülheim an der Ruhr
Holger Biedermann
Tel. +49 7275 61966-33
h.biedermann@rhm-rohstoffe.de

EcoGaIN

Projektkoordinator

G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH
Schwarze Kiefern 2
09633 Halsbrücke
Dr. Frank Haubrich
Tel. +49 3731 369-132
f.haubrich@geosfreiberg.de

Verbundpartner

Erz&Stein – Gesellschaft für Lagerstät-
ten- und Rohstoffberatung bR
Hof am Alten Fernweg
Talstraße 29
09627 Bobritzsch-Hilbersdorf
Tel. +49 173 3926-704
Dr. Michael Trinkler
erz-und-stein@web.de

Freiberger Compound Materials GmbH
Am Junger Löwe Schacht 5
09599 Freiberg
Thomas Reinhold
Tel. +49 3731 280-215
thomas.reinhold@fcm-germany.com

Geokompetenzzentrum Freiberg e.V.
Korngasse 1
09599 Freiberg
Dr. Wolfgang Reimer
Tel. +49 3731 7737-15
wolfgang.reimer@gkz-ev.de

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossen-
dorf
Bautzner Landstraße 400
01328 Dresden
Dr. Katrin Pollmann
Tel. +49 351 260 2946
k.pollmann@hzdr.de

Loser Chemie GmbH
Alfred Lange Straße 18
09599 Freiberg
Dr. Wolfram Palitzsch
Tel. +49 3731 41937-44
w.palitzsch@lc-freiberg.com

PPM Pure Metals GmbH
Am Bahnhof 1
38685 Langelsheim
Dr. Ullrich Kammer
Tel. +49 05326-5070
ulrich.kammer@recylex.de

Technische Universität Bergakademie
Freiberg
Akademiestraße 6
09599 Freiberg
Prof. Dr. Michael Stelter
Tel. +45 3731 39-2015
stelter@inemet.tu-freiberg.de

Freiberger Compound Materials GmbH
Am Junger Löwe Schacht 5
09599 Freiberg
Thomas Reinhold
Tel. +49 3731 280-215
thomas.reinhold@fcm-germany.com

Geokompetenzzentrum Freiberg e.V.
Korngasse 1
09599 Freiberg
Dr. Wolfgang Reimer
Tel. +49 3731 7737-15
wolfgang.reimer@gkz-ev.de

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossen-
dorf
Bautzner Landstraße 400
01328 Dresden
Dr. Katrin Pollmann
Tel. +49 351 260 2946
k.pollmann@hzdr.de

Loser Chemie GmbH
Alfred Lange Straße 18
09599 Freiberg
Dr. Wolfram Palitzsch
Tel. +49 3731 41937-44
w.palitzsch@lc-freiberg.com

ELEXSA

Projektkoordinator

Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP
Fraunhoferstr. 10
83626 Valley
Dr. Sebastian Dittrich
Tel. +49 8024 643-209
sebastian.dittrich@ibp.fraunhofer.de

Verbundpartner

CUTEC Clausthaler Umwelttechnik
Forschungszentrum
Leibnizstr. 23
38678 Clausthal-Zellerfeld
Dr. rer. nat. Torsten Zeller
Tel. +49 5323 72-6206
torsten.zeller@cutec.de

Ludwig-Maximilians-Universität
München
Geschwister-Scholl-Platz 1
80333 München
Tel. +49 89 2180-4292
Dr. Thomas Kunzmann
kunzmann@min.uni-muenchen.de

SIMET GmbH
Meisterstr. 22
46325 Borken
Dr. Matthias Sittard
Tel. +49 2861-2263
msittard@aol.com

Stadtreinigung Hamburg AöR
Bullerdeich 19
20537 Hamburg
Dr. Stefan Lübben
Tel. +49 40 2576-1071
s.luebben@srhh.de

ThyssenKrupp MillServices &
Systems GmbH
Emschertalstr. 12
46149 Oberhausen
Dr. Michael Dohlen
Tel. +49 208 65605-166
michael.dohlen@thyssenkrupp.com

ELIZE

Projektkoordinator

TU Bergakademie Freiberg,
Institut für Aufbereitungsmaschinen
Lampadiusstraße 4
09599 Freiberg
Prof. Dr. Holger Lieberwirth
Tel. +49 3731 39-2558
Holger.Lieberwirth@iam.tu-freiberg.de

Verbundpartner

G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH
Schwarze Kiefern 2
09633 Halsbrücke
Dr. Frank Haubrich
Tel. +49 3731 369-132
f.haubrich@geosfreiberg.de

Haver Engineering GmbH
Halsbrücker Str. 34
09599 Freiberg
Sandra Weyrauch
Tel. +49 3731 419294
s.weyrauch@haverengineering.de

Technische Universität Dresden
Helmholtzstr. 10
01069 Dresden
Prof. Dr. Frank Will
Tel. +49 351 463-33512
frank.will@tu-dresden.de

Thomas Werner Industrielle
Elektronik e.Kfm.
Alte Str. 2
01731 Kreischa
Dipl.-Ing. André Lienert
Tel. +49 35206 397346
lienert@werner-electronic.de

gagendta+

Projektkoordinator

Fraunhofer-Institut für Umwelt-,
Sicherheits- und Energietechnik
UMSICHT,
Institutsteil Sulzbach-Rosenberg
An der Maxhütte 1
92237 Sulzbach-Rosenberg
Dr. Peter Hense
Tel. +49 9661 908-435
peter.hense@umsicht.fraunhofer.de

Verbundpartner

ALBA Electronics Recycling GmbH
Heilbronner Str. 13
75031 Eppingen
Thomas Dietershagen
Tel. +49 7262 612-15
thomas.dietershagen@alba.info

Hubert Tippkötter GmbH
Velsen 49
48231 Warendorf
Hubert Tippkötter
Tel. +49 2584 9302-12
info@tippkoetter.de

Kautz Technologies GmbH
Reithallenstr. 5
77731 Willstätt
Dipl. Ing. Frank Fuhrer
Tel. +49 7854 186-34
f.fuhrer@kautz-gmbh.de

Technische Hochschule Nürnberg
Georg Simon Ohm
Keßlerplatz 12
90489 Nürnberg
Prof. Dr. Ulrich Teipel
Tel. +49 911 5880-1471
ulrich.teipel@th-nuernberg.de

GEM

Projektkoordinator

Deutsches GeoForschungsZentrum
Telegrafenberg
14473 Potsdam
Prof. Dr. Rolf L. Romer
Tel. +49 331 288-1405
romer@gfz-potsdam.de

Verbundpartner

BEAK Consultants GmbH
Am St. Niclas Schacht 13
09599 Freiberg
Dr. Andreas Barth
Tel. +49 3731 7813-52
andreas.barth@beak.de

G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH
Schwarze Kiefern 2
09633 Halsbrücke
Dr. René Kahnt
Tel. +49 3731 369-407
r.kahnt@geosfreiberg.de

Technische Universität Bergakademie
Freiberg
Akademiestr. 6
09599 Freiberg
Dr. Uwe Kroner
Tel. +49 3731 39-2434
kroner@geo.tu-freiberg.de

GERRI

Projektkoordinator

Fraunhofer IWKS
Brentanostraße 2A
09599 Freiberg
Dr. Claudia Güth
Tel. +49 6023 32039-869
info@gerri-germany.org

Verbundpartner

Rheinisch-Westfälische Technische
Hochschule Aachen
Intzestraße 3
52056 Aachen
Prof. Dr. Bernd Friedrich
Tel. +49 241 80-95850
bfriedrich@ime-aachen.de

Technische Universität Bergakademie
Freiberg
Akademiestr. 6
09599 Freiberg
Prof. Dr. Michael Stelter
Tel. +49 3731 39-2015
michael.stelter@inemet.tu-freiberg.de

Technische Universität Clausthal
Adolph-Roemer-Str. 2 a
38678 Clausthal-Zellerfeld
Prof. Dr. Daniel Goldmann
Tel. +49 5323 72-2735
daniel.goldmann@tu-clausthal.de

GORmin

Projektkoordinator

Helmholtz-Zentrum für
Umweltforschung – UFZ
Permoserstr. 15
04318 Leipzig
Dr. Alena Bleicher
Tel. +49 341 235 1745
alena.bleicher@ufz.de

GRAMM

Projektkoordinator

Helmholtz Zentrum Potsdam
– Deutsches GeoForschungsZentrum
Telegrafenberg
14473 Potsdam
PD Dr. Philipp Weis
Tel. +49 331-288-28967
philipp.weis@gfz-potsdam.de

GRAPHIT 2.0

Projektkoordinator

Technische Hochschule Nürnberg
Georg Simon Ohm
Wassertorstr. 10
90489 Nürnberg
Prof. Dr. Ulrich Teipel
Tel. +49 911 5880-1471
ulrich.teipel@th-nuernberg.de

Verbundpartner

Dieffenbacher GmbH Maschinen-
und Anlagenbau
Heilbronner Str. 20
75031 Eppingen
Dipl.-Ing. Jochen Kamm
Tel. +49 7262 65-5264
jochen.kamm@dieffenbacher.de

Eisenhuth GmbH & Co. KG
Friedrich-Ebert-Str. 203
37520 Osterode
Dr. Thorsten Hickmann
Tel. +49 5522 9067-14
t.hickmann@eisenhuth.de

Fraunhofer-Institut für Chemische
Technologie
Joseph-von-Fraunhofer-Straße 7
76327 Pfinztal
Dipl.-Ing. Elisa Seiler
Tel. +49 721 4640-354
elisa.seiler@ict.fraunhofer.de

HADEG Recycling GmbH, Stade
(assoziiert)

HiTEM

Projektkoordinator

Supracon AG
An der Lehmgrube 11
07751 Jena
Jens Kobow
Tel. +49 3641 2328-100
jens.kobow@supracon.com

Verbundpartner

GRM-services Oy, Suomi – Finland
Kelatie 1,
SF-01450 Vantaa, Suomi - Finland
Mr. Antti Kivinen
Tel. +35 840 5394224
antti.kivinen@grm-services.fi

Leibniz-Institut für Photonische
Technologien e.V.
Albert-Einstein-Str. 9
07745 Jena
Dr. Ronny Stolz
Tel. +49 3641 206-119
ronny.stolz@ipht-jena.de

HTMET

Projektkoordinator

Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe (BGR)
Stilleweg 2
30655 Hannover
Priv.-Doz. Dr. Torsten Graupner
Tel. +49 511 643 2569
torsten.graupner@bgr.de

Verbundpartner

CUTEC Clausthaler Umwelttechnik
Forschungszentrum
Leibnizstr. 23
38678 Clausthal-Zellerfeld
Dr. Torsten Zeller
Tel. +49 5323 72-6206
torsten.zeller@cutec.de

Recylex GmbH
Vahrenwalder Str. 269A
30179 Hannover
Dr. Andreas Sieverdingbeck
Tel. +49 5321 684-102
andreas.sieverdingbeck@recylex.de

Technische Universität Clausthal
Adolph-Roemer-Str. 2 a
38678 Clausthal-Zellerfeld
Prof. Dr. Daniel Goldmann
Tel. +49 5323 72-2735
daniel.goldmann@tu-clausthal.de

Lan-Tex

Projektkoordinator

Deutsches Textilforschungszentrum
Nord-West gGmbH (DTNW)
Adlerstr. 1
47798 Krefeld
Dr. Klaus Opwis
Tel. +49 2151- 8432014
opwis@dtnw.de

Verbundpartner

Decker Verfahrenstechnik GmbH
Am Röthenbühl 7
92348 Berg
Dipl.-Jur. Frank Naujoks
Tel. +49 9189 4410-21
frank.naujoks@decker-vt.de

Gebr. Röders Aktiengesellschaft
Böhmheide 18
29614 Soltau
Dr. Peter Gronwald
Tel. +49 5191 604-129
gronwald@gr-ag.de

Textilaurüstung Roessing GmbH
Tünter Heide 8
46414 Rhede
Thomas Siegfried
Tel. +49 2872 936-176
t.siegfried@roessing.com

MetalSens

Projektkoordinator

Fraunhofer-Institut für Produktionstech-
nologie IPT
Steinbachstraße 17
52074 Aachen
Raphael Kiesel M.Sc. M.Sc.
Tel. +49 241 8904-158
raphael.kiesel@ipt.fraunhofer.de

Verbundpartner

IME Metallurgische Prozesstechnik und
Metallrecycling
RWTH Aachen
Tom Gertjegerdes
Intzestraße 3
D-52056 Aachen
0241 80 95194
TGertjegerdes@metallurgie.rwth-
aachen.de

LLA Instruments GmbH
Dr. Günter Buzanich
Justus-von-Liebig-Straße 9/11
12489 Berlin
030 62907900
g.buzanich@lla.de

SICON GmbH
Christian Roth
Vordere Insbach 26
D-57271 Hilchenbach
02563 904700
C.Roth@sicon.eu

MExEM

Projektkoordinator

Fraunhofer-Institut für Keramische
Technologien und
Systeme (IKTS)
Winterbergstraße 28
01277 Dresden
Dr. Burkhardt Faßauer
Tel. +49 351 2553-7667
burkhardt.fassauer@ikts.fraunhofer.de

Verbundpartner

Andreas Junghans Anlagenbau und
Edelstahlbearbeitung GmbH & Co. KG
Chemnitzer Str. 63
09669 Frankenberg/Sa.
Dipl.- Ing. Andreas Stobbe
Tel. +49 37206 862-54
a.stobbe@ajunghans.de

G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH
Schwarze Kiefern 2
09633 Halsbrücke
Dipl.-Chem. Mirko Martin
Tel. +49 3731 369-296
m.martin@geosfreiberg.de

Nickelhütte Aue GmbH
Rudolf-Breitscheid-Str.
08280 Aue
Dr. Nils Günther
Tel. +49 3771 505-208
guenther@nickelhuette-aue.de

SAXONIA Standortentwicklungs- und
-verwaltungsgesellschaft mbH
Halsbrücker Str. 34
09599 Freiberg
Dr. Christin Jahns
Tel. +49 3731 3950-26
christin.jahns@saxonia-freiberg.de

West­säch­si­sche Hoch­schu­le Zwickau (FH)
Dr. Fried­richs-Ring 2 a
08056 Zwickau
Prof. Dr. Bern­hard Ge­men­de
Tel. +49 375 536-1787
bernhard.gemende@fh-zwickau.de

MinNoBeck

Projektkoordinator

Department for Physics and Earth
Sciences
Jacobs University Bremen gGmbH
Campus Ring 1
28759 Bremen
Prof. Dr. Michael Bau
Tel. +49 421 200-3564
m.bau@jacobs-university.de

Verbundpartner

Georg-August-Universität Göttingen
Goßlerstr. 5-7
37073 Göttingen
Prof. Dr. Jonas Kley
Tel. +49 551 39-9700
jkley@gwdg.de

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
Schlossplatz 4
91054 Erlangen
Prof. Dr. Reiner Klemd
Tel. +49 9131 85-22699
klemd@geol.uni-erlangen.de

Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Telegrafenberg
14473 Potsdam
Dr. Volker Lüders
Tel. +49 331 288-1434
value@gfz-potsdam.de

MinSEM

Projektkoordinator

Fraunhofer ISC – Institutsteil IWKS
Brentanostrasse 2a
63755 Alzenau
Dr. rer. nat. Gert Homm
Tel. +49 6023 32039-867
gert.homm@isc.fraunhofer.de

Verbundpartner

Barberini GmbH
Hüttenstr. 1
31073 Grünenplan
Dr. Katja Engel
Tel. +49 151 26467754
k.engel@barberiniglass.de

Duesmann & Hensel Recycling GmbH
Mühlweg 10
63743 Aschaffenburg
Dr. Friedhelm Schöne
Tel. +49 6028 1209-538
f.schoene@duerec.com

Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG
Heraeusstrasse 12-14
63450 Hanau
Dr. Bernhard Bauer-Siebenlist
E-Mail: bernhard.bauer-siebenlist@
heraeus.com

Maleki GmbH
Carl-Stolcke Str. 1
49090 Osnabrück
Mina Basiri
Tel. +49 541 2024799-2
mbasiri@maleki.net

ratiochem GmbH
Hammermühlweg 1
96317 Kronach
Dr. Lothar Fröhlich
Tel. +49 9261 501 849-10
l.froehlich@ratiochem.org

Technische Universität Dresden
Helmholtzstr. 10
01069 Dresden
Prof. Dr. Thomas Sträßner
Tel. +49 351 463-38571
thomas.strassner@chemie.tu-dresden.de

ThyssenKrupp MillServices &
Systems GmbH
Emschertalstr. 12
46149 Oberhausen
Dr. Michael Dohlen
Tel. +49 208 65605-166
michael.dohlen@thyssenkrupp.com

NeW-Bat

Projektkoordinator

Geschäftsfeldleiter Energiematerialien
Fraunhofer-Projektgruppe IWKS
Rodenbacher Chaussee 4
63457 Hanau
Daniel Horn, M.Sc.
Tel. +49 6023 32039-854
daniel.horn@isc.fraunhofer.de

Verbundpartner

Gemeinsames Rücknahmesystem
Servicegesellschaft mbH
Heidenkampsweg 44
20097 Hamburg
Dipl.-Ing. Sebastian Kross
Tel. +49 40 2377-8957
kross@grs-batterien.de

ImpulsTec GmbH
Wilhelm-Eichler-Straße 34
01445 Radebeul
Dipl.-Ing. Stefan Eisert
Tel. +49 351 20502651
stefan.eisert@impulstec.com

Lars Walch GmbH & Co. KG
Raiffeisenstr. 24
91460 Baudenbach
Matthias Walch
Tel. +49 9164 9981-18
matthias.walch@walch-recycling.de

Leclanché GmbH
Industriestr. 1
77731 Willstätt
Dr. Günther Jutz
Tel. +49 7852 818-31
guenter.jutz@leclanche.com

OptiWiM

Projektkoordinator

CBM Gesellschaft für Consulting,
Business und
Management mbH
Niederbexbacher Straße 67
66450 Bexbach
Prof. Dr. Mathias J. Bauer
Tel. +49 6826 510910
bauer@cbm-ac.de

Verbundpartner

Rheinisch-Westfälische Technische
Hochschule Aachen
Templergraben 55
52062 Aachen
Prof. Dr. Hermann Wotruba
Tel. +49 241 80-97246
wotruba@amr.rwth-aachen.de

r⁴-INTRA

Projektkoordinator

CUTEC Clausthaler Umwelttechnik
Forschungszentrum
Leibnizstraße 23
38678 Clausthal-Zellerfeld
Prof. Dr. Daniel Goldmann
Tel. +49 5323 72-2725
goldmann@aufbereitung.tu-clausthal.de

Verbundpartner

Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe (BGR)
Stilleweg 2
30655 Hannover
Dr. Hildegard Wilken
Tel. +49 511 643-2362
hildegard.wilken@bgr.de

Fraunhofer-Institut für System- und
Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
Dr. Katrin Ostertag
Tel. +49 721 6809-116
katrin.ostertag@isi.fraunhofer.de

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstr. 12
76131 Karlsruhe
Hochschule Pforzheim - Gestaltung,
Technik, Wirtschaft und Recht
Tiefenbronner Str. 65
75175 Pforzheim
Prof. Dr. Jörg Woidasky
Tel. +49 7231 28-6489
joerg.woidasky@hs-pforzheim.de

REEMAP

Projektkoordinator

Helmholtz Zentrum Potsdam
Deutsches Geoforschungszentrum GFZ
Telegrafenberg
14473 Potsdam
Dr. Christian Mielke
Tel. +49 331 288 1820
chmielke@gfz-potsdam.de

Verbundpartner

Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe (BGR)
Stilleweg 2
30655 Hannover
Dr. Martin Schodlok
Tel. +49 511 643-3007
martin.schodlok@bgr.de

Universität Potsdam
Am Neuen Palais 10
14469 Potsdam
apl. Prof. Dr. Uwe Altenberger
Tel. +49 331 977-5806
uwe@geo.uni-potsdam.de

ResErVar

Projektkoordinator

Helmholtz-Zentrum Dresden –
Rossendorf
Helmholtz-Institut Freiberg für
Ressourcentechnologie
Chemnitzer Str. 40
09599 Freiberg
Prof. Dr. Jens Gutzmer
Tel. +49 351 260 4400
j.gutzmer@hzdr.de

Verbundpartner

Eberhard Karls Universität Tübingen
Geschwister-Scholl-Platz
72074 Tübingen
Prof. Dr. Gregor Markl
Tel. +49 7071 293060
markl@uni-tuebingen.de

Rheinisch-Westfälische Technische
Hochschule Aachen
Templergraben 55
52062 Aachen
Prof. Dr. Franz Michael Meyer
Tel. +49 241 8095774
m.meyer@rwth-aachen.de

Technische Universität Bergakademie
Freiberg
Akademiestr. 6
09599 Freiberg
Prof. Dr. Thomas Seifert
Tel. +49 3731 39-3527
thomas.seifert@mineral.tu-freiberg.de

Technische Universität Clausthal
Adolph-Roemer-Str. 2 a
38678 Clausthal-Zellerfeld
Prof. Dr. Bernd Lehmann
Tel. +49 5323 72-2511
bernd.lehmann@tu-clausthal.de

REWITA

Projektkoordinator

Technische Universität Clausthal
Institut für Aufbereitung, Deponie-
technik und Geomechanik (IFAD)
Walther-Nernst-Str. 9
38678 Clausthal-Zellerfeld
Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann
Tel. +49 05323 72-2038
goldmann@aufbereitung.tu-clausthal.de

Verbundpartner

CUTEC Clausthaler Umwelttechnik
Forschungszentrum
Leibnizstr. 23
38678 Clausthal-Zellerfeld
Dr. Torsten Zeller
Tel. +49 5323 72-6206
torsten.zeller@cutec.de

Harz-Metall GmbH
Hüttenstr. 6
38642 Goslar
Florian Schmidt
Tel. +49 5321 688-207
florian.schmidt@recylex.de

pdv-software GmbH
Stapelner Str. 1
38644 Goslar
Tristan Niewisch
Tel. +49 5321 5732-22
tn@pdv-software.de

PPM Pure Metals GmbH
Hoppenstedter Str. 6
38835 Osterwieck
Dr. Ulrich Kammer
Tel. +49 5326 507-350
ulrich.kammer@recylex.de

Prof. Burmeier Ingenieurgesell-
schaft mbH
Steinweg 4
30989 Gehrden
Dipl.-Ing. Christian Poggendorf
Tel. +49 5108 92172-0
c.poggendorf@burmeier-ingenieure.de

Stöbich Holding GmbH & Co. KG
Pracherstieg 6
38644 Goslar
Dr. Jochen Stöbich
Tel. +49 5321 5708-25
j.stoebich@stoebich.de

SEEsand

Projektkoordinator

G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH
Schwarze Kiefern 2
09633 Halsbrücke
Dipl.-Chem. Mirko Martin
Tel. +49 3731 369-296
m.martin@geosfreiberg.de

Verbundpartner

André Voß Erdbau und Transport
GmbH
Elmenhorster Weg 20
18109 Rostock
Ludger Grüßing
Tel. +49 381 87718-112
gruessing@andrevoss.de

Bundesanstalt für Geowissenschaften
und Rohstoffe (BGR)
Stilleweg 2
30655 Hannover
Prof. Dr. Axel Schippers
Tel. +49 511 643-3103
axel.schippers@bgr.de

Geokompetenzzentrum Freiberg e.V.
Burgstr. 19
09599 Freiberg
Dr. Wolfgang Reimer
Tel. +49 3731 7737-15
wolfgang.reimer@gkz-ev.de

Imerys Fused Minerals Laufenburg
GmbH
Ferroweg 1
79725 Laufenburg
Dr. Angelika Priese
Tel. +49 7763 933-515
angelika.priese@imerys.com

Landesamt für Umwelt, Naturschutz
und Geologie Mecklenburg-Vor-
pommern
Goldberger Str. 12
18273 Güstrow
Dr. Andreas Börner
Tel. +49 3843 777401
andreas.boerner@lung.mv-regierung.de

Technische Universität Clausthal
Adolph-Roemer-Str. 2 a
38678 Clausthal-Zellerfeld
Prof. Tobias Elwert
Tel. +49 5323-72-2119
tobias.elwert@tu-clausthal.de

SE-FLECX

Projektkoordinator

Helmholtz-Zentrum Dresden-
Rossendorf
Helmholtz-Institut Freiberg
für Ressourcentechnologie
Abteilung Metallurgie und Recycling
Chemnitz­er Straße 40
09599 Freiberg
Prof. Dr. Christiane Scharf
Tel. +49 351 260 5529
c.scharf@hzdr.de

Verbundpartner

BASF SE
Carl-Bosch-Str. 38
67063 Ludwigshafen am Rhein
Dr. Martin Merger
Tel. +49 621 60-44685
martin.merger@basf.com

CMI UVK GmbH
Robert-Bosch-Str. 12
56410 Montabaur
Dipl.-Ing. Egon Sehner
Tel. +49 151 551449-84
egon.sehner@cmigroupe.com

Technische Universität Bergakademie
Freiberg
Akademiestr. 6
09599 Freiberg
Dr. Peter Fröhlich
Tel. +49 3731 39-3663
peter.froehlich@chemie.tu-freiberg.de

Universität Leipzig
Ritterstr. 26
04109 Leipzig
Prof. Dr. Berthold Kersting
Tel. +49 341 9736143
b.kersting@uni-leipzig.de

SEM²

Projektkoordinator

G.U.B. Ingenieur AG
Katharinenstr. 11
08056 Zwickau
Dr. Wilfried Hüls | Tel. +49 375 27175-0
E-Mail: info@gub-ing.de

Verbundpartner

Gesellschaft zur Förderung von
Medizin-, Bio- und Umwelt-
Technologien e.V.
Erich-Neuß-Weg 5
06120 Halle (Saale)
Dipl. Chem. Meinolf Stützer
Tel. +49 345 77796-43
stuetzer@gmbu.de

Helmholtz-Institut Freiberg für Ressour-
centechnologie
Chemnitz­er Str. 40
09599 Freiberg
Dr. Sabine Kutschke
Tel. +49 351 260-2151
s.kutschke@hzdr.de

Helmholtz-Zentrum Dresden -
Rossendorf
Bautzner Landstr. 400
01328 Dresden
Dr. Vinzens Brendler
Tel. +49 351 260-2430
v.brendler@fzd.de

Leibniz-Institut für Pflanzengenetik
und Kulturpflanzenforschung (IPK)
Corrensstr. 3
06466 Gatersleben
Prof. Dr. Gotthard Kunze
Tel. +49 39482 5-247
kunzeg@ipk-gatersleben.de

SEMAREC

Projektkoordinator

Technische Universität Clausthal
Institut für Aufbereitung, Deponie-
technik und Geomechanik
Walther-Nernst-Str. 9
38678 ClausthalZellerfeld
Tobias Elwert
Tel. +49 5323 72 2038
tobias.elwert@tuclausthal.de

Verbundpartner

Electrocycling GmbH
Landstraße 91
38644 Goslar
Guido Sellin
Tel. +49 5321 336744
guido.sellin@electrocycling.de

PPM Pure Metals GmbH
Hoppenstedter Str. 6
38835 Osterwieck
Dr. Ulrich Kammer
Tel. +49 5326 507-350
ulrich.kammer@recylex.de

SESAM

Projektkoordinator

Technische Universität München
Department Chemie – Fachgebiet
Analytische Chemie
Lichtenbergstraße 4
85748 Garching bei München
Prof. Dr. Michael Schuster
Tel. +49 89 289-13763
michael.schuster@tum.de

Verbundpartner

Bundesanstalt für Gewässerkunde
(BfG)
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Dr. Lars Düster
Tel. +49 261 1306-5275
duester@bafg.de

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Wankelstr. 5
70563 Stuttgart
Dipl.-Ing. Stefan Albrecht
Tel. +49 711 970-3170
stefan.albrecht@lbp.uni-stuttgart.de

Theisenschlamm

Projektkoordinator

Helmholtz-Zentrum für Umwelt-
forschung GmbH - UFZ
Department Analytik
Permoserstrasse 15
04318 Leipzig
Prof. Dr. Thorsten Reemtsma
Tel. +49 341 235 1261
thorsten.reemtsma@ufz.de

Verbundpartner

Adelphi Research gGmbH
Caspar-Theyß-Str. 14 a
14193 Berlin
Dipl.-Pol. Lukas Rüttinger
Tel. +49 30 8900068-37
ruettinger@adelphi.de

B.R.A.I.N. Biotechnology Research
and Information Network AG
Darmstädter Str. 34-36
64673 Zwingenberg
Dr. Guido Meurer
Tel. +49 6251 9331-29
gm@brain-biotech.de

G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH
Schwarze Kiefern 2
09633 Halsbrücke
Dipl.-Chem. Mirko Martin
Tel. +49 3731 369-296
m.martin@geosfreiberg.de

Helmholtz-Zentrum Dresden -
Rossendorf e. V.
Bautzner Landstr. 400
Prof. Christiane Scharf
Tel. +49 351 260-4429
c.scharf@hzdr.de

Nickelhütte Aue GmbH
Rudolf-Breitscheid-Str.
08280 Aue
Dr. Nils Günther
Tel. +49 3771 505-351
guenther@nickelhueette-aue.de

Technische Universität Bergakademie
Freiberg
Akademiestr. 6
09599 Freiberg
Prof. Dr. Michael Schlömann
Tel. +49 3731 39-3739
michael.schloemann@ioez.tu-
freiberg.de

TransTech

Projektkoordinator

Rheinisch-Westfälische Technische
Hochschule Aachen
Intzestraße 3
52056 Aachen
Prof. Dr. Bernd Friedrich
Tel. +49 241 80-95850
bfriedrich@ime-aachen.de

Verbundpartner

MEAB Chemie Technik GmbH
Dennewartstr. 25
52068 Aachen
Dr. Milena Stopic
Tel. +49 241 96311-80
milena.stopic@meab-mx.com

MIMI Tech GmbH
Preusweg 98
52074 Aachen
Dr. Semiramis Friedrich
Tel. +49 241 1684374
info@mimi-tech.com

UPNS4D+

Projektkoordinator

indurad GmbH
Belvedereallee 5
52070 Aachen
Dr. Matthias Rabel
Tel. +49 241 538070-0
matthias.rabel@indurad.com

Verbundpartner

Fachhochschule Aachen
Bayernallee 11
52066 Aachen
Prof. Ingrid Scholl
Tel. +49 241 6009-52177
scholl@fh-aachen.de

Fritz Rensmann, Maschinenfabrik,
Diesellokomotiven, Getriebe
GmbH & Co. KG
Bünnerhelfstr. 33
44379 Dortmund
Dr. Fritz Rensmann
Tel. +49 231 5655951-7
f.rensmann@rensman.com

GHF Fahrzeuge GmbH
Emscherstr. 53
45891 Gelsenkirchen
Dr. Felix Straßburger
Tel. +49 209 38907-340
Felix.strassburger@ghf-fahrzeuge.de

M I L A N Geoservice GmbH
Zum Tower 4
01917 Kamenz
Sven Jany
Tel. +49 355 28924-632
s.jany@milan-geoservice.de

Rheinisch-Westfälische Technische
Hochschule Aachen
Templergraben 55
52062 Aachen
Prof. Dr. Elisabeth Clausen
Tel. +49 241 80-95680
eclausen@amt.rwth-aachen.de

Technische Universität Bergakademie
Freiberg
Akademiestr. 6
09599 Freiberg
PD Dr. Ralf Donner
Tel. +49 3731 39-3555
ralf.donner@tu-freiberg.de

XGraphic Ingenieurgesellschaft mbH
Aretzstr. 9
52070 Aachen
Dr. David Buttgerit
Tel. +49 241 89410-15
buttgerit@xgraphic.de

VAFLOW

Projektkoordinator

Fraunhofer-Institut für Umwelt-,
Sicherheits- und Energietechnik
UMSICHT
Osterfelder Str. 3
46047 Oberhausen
Jochen Nühlen
Tel. +49 208 8598-1370
jochen.nuehlen@umsicht.fraunhofer.de

Verbundpartner

CMS Green Energy GmbH
Am Rennplatz 6a
41334 Nettetal
Dipl.-Ing. Michael Reich
Tel. +49 2157 1244931
m.reich@cmsgreenenergy.com

Nickelhütte Aue GmbH
Rudolf-Breitscheid-Str. 65-75
08280 Aue
Dr. Nils Günther
Tel. +49 3771 505-208
guenther@nickelhuettenue-aue.de

Technische Universität Bergakademie
Freiberg
Akademiestr. 6
09599 Freiberg
Prof. Dr. Michael Stelter
Tel. +49 3731 39-2015
stelter@inemet.tu-freiberg.de

WISTAMERZ

Projektkoordinator

Beak Consultants GmbH
Am St. Niclas Schacht 13
09599 Freiberg
Dr. Andreas Barth
Tel. +49 3731-781350
andreas.barth@beak.de

Verbundpartner

Helmholtz-Zentrum Dresden-
Rossendorf
Helmholtz-Institut Freiberg
für Ressourcentechnologie
Abteilung Metallurgie und Recycling
Chemnitzer Straße 40
09599 Freiberg
Prof. Dr. Jens Gutzmer
Tel. +49 351 260-44400
jens.gutzmer@mineral.tu-freiberg.de

Technische Universität Bergakademie
Freiberg
Akademiestr. 6
09599 Freiberg
Prof. Dr. Klaus Stanek
Tel. +49 3731 39-3599
stanek@geo.tu-freiberg.de



Impressum

Herausgeber

CUTEC Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum der TU Clausthal
Leibnizstraße 23 · 38678 Clausthal-Zellerfeld
Tel. 05323 72-6124 · Fax 05323 933-100
sekretariat@cutec.de · www.cutec.de

Redaktion

Dipl.-Ing. Andre Bertram, CUTEC Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum der TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld

Gestaltung

Gabriela Wessels, CUTEC Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum der TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld

Bildnachweis

Titel: Andre Bertram, CUTEC Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum der TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld
Innen: Andre Bertram, CUTEC: S. 4, 28 unten, 45 oben, 73, 88, 95, 102, 103; DESMEX: S. 10; indurad: S. 11 oben; Klaus Stedingk, LABG: S. 28 oben, 29 oben; Björn Holm, TU Clausthal: S. 44 oben; Ralf Perret, tkMSS: S. 44 unten; Covestro: S. 72 oben; Fraunhofer ISC: S. 72 unten; Thinkstock: S. 89; Annika Borchers, Hochschule Pforzheim: S. 94 oben; Marika Mehnert, Ringo Schwabe, TU Bergakademie Freiberg: S. 94 unten;

Bezug über

CUTEC Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum der TU Clausthal
Leibnizstraße 23 · 38678 Clausthal-Zellerfeld
Tel. 05323 72-6124 · E-Mail: sekretariat@cutec.de

Druck

Oberharzer Druckerei
Fischer & Thielbar GmbH
Alte Fuhrherrenstraße 5
38678 Clausthal-Zellerfeld
OT Buntenbock

Ansprechpartner beim BMBF:

Dr. Helmut Löwe
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat 727 - Ressourcen, Kreislaufwirtschaft; Geoforschung
53170 Bonn
Tel. 022899-572110 · E-Mail: helmut.loewe@bmbf.bund.de

Stand

1. Auflage, September 2019

Ansprechpartnerin beim Projektträger:

Dr. Hannelore Katzke, Projektträgerschaft Ressourcen und Nachhaltigkeit
Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH
Zimmerstraße 26-27
10969 Berlin
Tel. 030-20199 3303 · E-Mail: h.katzke@fz-juelich.de